

**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**MEZCLA DE CASCARILLA DE NUEZ DE PALMISTE Y RAQUIS COMO  
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO QUÍMICO**


**AUTOR: DAVID ALEJANDRO GAONA REINOSO  
TUTOR: ING. MARIO ROMEO CALLE MIÑACA**

**QUITO  
2014**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor de la tesis de grado, titulada “MEZCLA DE CASCARILLA DE NUEZ DE PALMISTE Y RAQUIS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA”, me permito certificar que la misma es original y ha sido desarrollada por el señor DAVID ALEJANDRO GAONA REINOSO, bajo mi dirección y conforme con todas las observaciones realizadas, considero que el trabajo está concluido y tiene mi aprobación.

En la ciudad de Quito, a los 19 días del mes de Mayo de 2014



Ing. Mario Romeo Calle Miñaca  
PROFESOR TUTOR

## **AUTORIZACIÓN DE LA AUTORIA INTELECTUAL**

Yo, DAVID ALEJANDRO GAONA REINOSO en calidad de autor de la tesis de grado realizada sobre MEZCLA DE CASCARILLA DE NUEZ DE PALMISTE Y RAQUIS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA , por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 19 días del mes de Mayo de 2014



David Alejandro Gaona Reinoso

C.C. 1722866306

ajandro90@hotmail.com

## DEDICATORIA

*A mis padres Jorge Gaona y Susana Reinoso por brindarme su amor incondicional, siendo mis ejemplos a seguir durante toda mi vida y ser los pilares fundamentales para alcanzar lo que me he propuesto gracias a su lucha constante y apoyo enseñándome el valor del trabajo duro y la perseverancia. A mis hermanos Jorge Luis y Jessica por acompañarme en los momentos más difíciles que he tenido que afrontar, y que con su amor y apoyo me han brindado fuerzas para poder superarlos. A mis amigos que durante toda la carrera me brindaron su amistad sincera y compartimos momentos que perdurarán en mi mente por siempre y por enseñarme la virtud de la sencillez. A mi novia Sarita, que a sido un apoyo fundamental y que con su amor me ha animado siempre a seguir adelante. A mis sobrinos, que son el motor principal de mi vida y siempre sepan que pueden lograr lo que se propongan.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería Química por acogerme en sus brazos y en sus aulas impartirme el conocimiento adquirido para ser un profesional digno de la Universidad Central del Ecuador.

Al Ing. Pablo Begnini e Ing. Alejandro Duque por la predisposición en la entrega de los recursos necesarios para el desarrollo de esta tesis, así como su apoyo moral y la amistad brindada.

Al Ing. Luis Calle, Profesor de la Facultad de Ingeniería Química y al personal del DPEC por el apoyo brindado para el desarrollo de los ensayos durante mi permanencia en el laboratorio.

A los profesores que conforman la Facultad de Ingeniería Química por impartir sus conocimientos y experiencias para formarme como profesional en conjunto con las enseñanzas de valores éticos en el desempeño de mis futuras funciones como Ingeniero Químico.

Al Ing. Andrés De La Rosa por el apoyo y la amistad brindada durante el transcurso de la carrera.

Al Ing. Ricardo Narváez por la amistad brindada y permitirme el ingreso al laboratorio del INER, ya que sin su ayuda, predisposición y conocimientos el desarrollo de este tema habría sido imposible.

Al Ing. Mario Calle por guiarme en el desarrollo de este trabajo de grado con sus conocimientos.

## CONTENIDO

	pág.
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE GRÁFICOS .....	xiv
LISTA DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
1. BIOMASA.....	3
1.1. Recurso Biomásico.....	3
1.2. Clasificación de la biomasa .....	4
1.2.1. <i>Modo en que se obtiene</i> .....	4
1.2.2. <i>Uso final.</i> .....	4
1.2.2.1. <i>Biocombustibles sólidos</i> .....	5
1.2.2.2. <i>Biomasa residual húmeda.</i> .....	5
1.2.3. <i>Cultivos Energéticos</i> .....	5
1.2.3.1. <i>Clasificación de los cultivos energéticos.</i> .....	6
1.3. Tipos de biomasa.....	6
1.4. Residuos de palma africana.....	7
1.4.1. <i>Palma africana y palmiste</i> .....	7
1.4.2. <i>Raquis.</i> .....	8
1.5. Caracterización de la biomasa .....	9
1.5.1. <i>Propiedades físicas</i> .....	10
1.5.1.1. <i>Densidad Real y Aparente</i> .....	10
1.5.1.2. <i>Humedad</i> .....	11
1.5.1.3. <i>Distribución granulométrica</i> .....	12

1.5.2. <i>Propiedades Químicas</i> .....	12
1.5.2.1. <i>Composición elemental</i> .....	13
1.5.2.2. <i>Análisis Inmediato</i> .....	13
1.5.2.3. <i>Poder calorífico</i> .....	16
1.6. Usos de la biomasa. ....	18
1.6.1. <i>Aplicaciones térmicas</i> .....	18
1.6.2. <i>Aplicaciones eléctricas</i> .....	19
 2. ENERGÍA DE LA BIOMASA .....	20
2.1. Procesos de conversión.....	21
2.1.1. <i>Combustión directa</i> .....	21
2.1.1.1. <i>Generación Eléctrica</i> .....	22
2.1.2. <i>Procesos termoquímicos</i> .....	23
2.1.3. <i>Procesos bioquímicos</i> .....	24
2.2. Potencial energético de la biomasa.....	25
2.3. Ventajas y desventajas del uso de biomasa con fines energéticos.....	26
2.3.1. <i>Ventajas del uso de biomasa</i> .....	26
2.3.2. <i>Desventajas del uso de biomasa</i> .....	27
 3. PARTE EXPERIMENTAL.....	28
3.1. Diseño experimental.....	28
3.1.1. <i>Esquemas del proceso de caracterización de la cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana.</i> .....	28
3.1.2. <i>Esquema del proceso de preparación de mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana</i> .....	29
3.1.3. <i>Esquema del proceso de caracterización de las mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana</i> .....	30
3.2. Descripción del diseño experimental.....	30
3.3. Materiales y equipos.....	31
3.4. Sustancias y reactivos.....	32
3.5. Procedimiento experimental .....	32
3.5.1. <i>Molienda y Pulverización</i> .....	32
3.5.2. <i>Preparación de mezclas</i> .....	32
3.5.3. <i>Análisis proximal (Porcentaje de humedad y cenizas)</i> .....	32

3.5.4. <i>Análisis elemental (C, H, N, S)</i> .....	33
3.5.5. <i>Poder Calorífico</i> .....	34
 4. DATOS EXPERIMENTALES .....	36
4.1. Mezclas de cascarilla de nuez de palmiste y raquis.....	36
4.2. Caracterización proximal de la cascarilla, raquis y las mezclas preparadas.....	36
4.2.1. <i>Datos para el ensayo de porcentaje de cenizas</i> .....	36
4.2.2. <i>Datos para el ensayo de porcentaje de humedad</i> .....	37
4.3. Caracterización elemental cascarilla de nuez de palmiste, raquis y mezclas preparadas .....	39
4.4. Caracterización poder calorífico cascarilla de nuez de palmiste, raquis y mezclas preparadas.....	40
 5. PROCESAMIENTO DE DATOS .....	41
5.1. Cálculos para la caracterización proximal.....	41
5.1.1. <i>Cálculo del porcentaje de cenizas</i> .....	41
5.1.2. <i>Cálculo del porcentaje de humedad</i> .....	43
5.2. Cálculo de la composición elemental promedio de la cascarilla de palmiste, raquis de palma, y mezclas .....	46
5.3. Relación entre poder calorífico y variables analizadas.....	53
5.3.1. <i>Relación entre poder calorífico y porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste</i> .....	53
5.3.2. <i>Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de cenizas</i> .....	54
5.3.3. <i>Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de humedad</i> .....	55
5.4. Relación múltiple entre poder calorífico y variables de análisis elemental y proximal .....	58
5.4.1. <i>Regresión lineal múltiple entre poder calorífico y variables analizadas</i> .....	58
5.4.2. <i>Ecuación del modelo de regresión lineal</i> .....	63
5.5. Cálculo del poder calorífico con el modelo de regresión lineal múltiple .....	64
5.6. Comparación entre el poder calorífico con la relación de Gaur-Reed y el poder calorífico experimental medido.....	65
5.7. Cálculo de la cantidad de cascarilla de nuez de palmiste y de raquis de palma africana generada en la producción de la empresa AEXAV .....	66
5.8. Cálculo de las propiedades químicas de la mezcla entre la cantidad recursos biomásicos disponibles en la empresa AEXAV .....	68
5.8.1. <i>Cálculo del porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste presente en la mezcla</i> .....	70
5.8.2. <i>Cálculo del porcentaje de cenizas de la mezcla de residuos biomásicos disponibles</i> .....	69



5.8.3. <i>Cálculo del porcentaje de humedad de la mezcla de residuos biomásicos disponibles</i> .....	69
5.8.4. <i>Cálculo del porcentaje de C, H, N, S de la mezcla de residuos biomásicos disponibles</i> .....	69
5.8.5. <i>Cálculo del poder calorífico de la mezcla de residuos biomásicos disponibles</i> .....	70
5.9. <i>Cálculo del potencial energético de la mezcla de residuos biomásicos disponibles</i> .....	70
6. DISCUSIÓN.....	72
7. CONCLUSIONES.....	74
8. RECOMENDACIONES .....	76
CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS.....	82

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estados típicos de la biomasa.....	7
Tabla 2. Datos producción y residuos de palmiste extractora AEXAV .....	9
Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa.....	10
Tabla 4. Intervalos de humedad de algunos tipos de biomasa .....	11
Tabla 5. Composición elemental de varios tipos de biomasa.....	13
Tabla 6. Análisis inmediato libre de humedad de algunos tipos de biomasa .....	16
Tabla 7. Poderes calóricos de residuos biomásicos.....	17
Tabla 8. Potencial Energético de residuos biomásicos.....	25
Tabla 9: Proporciones de cascarilla de nuez de palmiste y raquis .....	31
Tabla 10. Pesos de cascarilla de nuez de palmiste y raquis .....	36
Tabla 11. Datos para el porcentaje de cenizas cascarilla de nuez de palmiste .....	36
Tabla 12. Datos para el porcentaje de cenizas raquis de palma africana .....	37
Tabla 13. Datos para el porcentaje de cenizas mezclas de cascarilla y raquis .....	37
Tabla 14. Datos para el porcentaje de humedad cascarilla de nuez de palmiste .....	37
Tabla 15. Datos para el porcentaje de humedad raquis de palma africana.....	38
Tabla 16. Datos para el porcentaje de humedad mezclas cascarilla y raquis .....	38
Tabla 17. Composición elemental cascarilla de nuez de palmiste .....	39
Tabla 18. Composición elemental raquis de palma africana.....	39
Tabla 19. Composición elemental mezclas de cascarilla y raquis.....	39
Tabla 20. Poder Calorífico cascarilla de nuez de palmiste.....	40
Tabla 21. Poder Calorífico raquis de palma africana .....	40
Tabla 22. Poder Calorífico mezclas de cascarilla y raquis.....	40
Tabla 23. Porcentaje de cenizas para la cascarilla de nuez de palmiste .....	42
Tabla 24. Porcentaje de cenizas para el raquis de palma africana.....	42
Tabla 25. Porcentaje de cenizas para las mezclas de cascarilla y raquis.....	42
Tabla 26. Porcentaje de humedad para la cascarilla de nuez de palmiste .....	44
Tabla 27. Porcentaje de humedad para el raquis de palma africana.....	44
Tabla 28. Porcentaje de humedad para las mezclas de cascarilla y raquis.....	44
Tabla 29. Composición elemental promedio de las muestras analizadas.....	46

Tabla 30. Resumen de las propiedades químicas de cascarilla, raquis, y mezclas.....	52
Tabla 31. Poder Calorífico en función del porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste .....	53
Tabla 32. Datos de variables explicativas y variable dependiente .....	59
Tabla 33. Valores de la media y desviación típica de variables explicativas y dependiente.....	61
Tabla 34. Correlación de Pearson entre variables explicativas y dependiente.....	61
Tabla 35. Coeficiente de correlación $R^2$ para el modelo de regresión lineal múltiple .....	62
Tabla 36. Coeficientes del modelo de regresión múltiple .....	62
Tabla 37. Variable eliminada por el software .....	63
Tabla 38. Comparación entre poder calorífico calculado y medido.....	65
Tabla 39. Comparación poder calorífico entre Gaur-Reed y .....	66
Tabla 40. Producción anual de residuos biomásicos de la empresa AEXAV. ....	66

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Generación de recursos biomásicos .....	4
Figura 2. Residuos biomásicos como biocombustibles sólidos .....	5
Figura 3. Fruto de palma africana .....	8
Figura 4. Raquis residual de la extracción de aceite de palma .....	8
Figura 5. Valor calorífico en función de la humedad relativa .....	12
Figura 6. Curva termogravimétrica para el análisis inmediato de combustibles sólidos .....	14
Figura 7. Generación de calor por combustión de biomasa .....	18
Figura 8. Central eléctrica con biomasa .....	19
Figura 9. Tipos de biomasa y procesos para obtención de energía .....	21
Figura 10. Esquema del ciclo de Rankine de una termoeléctrica.....	22
Figura 11. Costos de generación eléctrica versus tamaño de la planta (Unión Europea).....	23
Figura 12. Clasificación de los procesos termoquímicos .....	24
Figura 13. Procesos de conversión de la biomasa y aplicaciones de sus productos.....	24
Figura 14. Esquema del proceso de caracterización de la cascarilla de nuez de palmiste. ....	28
Figura 15. Esquema del proceso de caracterización del raquis de palma africana.....	29
Figura 16. Esquema del proceso de preparación de mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana .....	29
Figura 17. Esquema del proceso de caracterización de las mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana. ....	30
Figura 18. Datos variables explicativas e independiente en el software SPSS 19 .....	60
Figura 19. Ingreso de variables dependiente y explicativas para la regresión .....	60

## LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Relación porcentaje de cenizas y porcentaje de cascarilla y raquis. ....	43
Gráfico 2. Relación porcentaje de humedad y porcentaje de cascarilla de palmiste en las mezclas. ....	45
Gráfico 3. Porcentaje de carbono en función del porcentaje de cascarilla de palmiste.....	47
Gráfico 4. Porcentaje de hidrógeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste .....	48
Gráfico 5. Porcentaje de nitrógeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste .....	49
Gráfico 6. Porcentaje de azufre en función del porcentaje de cascarilla de palmiste.....	50
Gráfico 7. Porcentaje de oxígeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste.....	51
Gráfico 8. Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de cascarilla de palmiste .....	53
Gráfico 9. Relación entre poder calorífico y porcentaje de cenizas .....	54
Gráfico 10. Relación entre poder calorífico y porcentaje de humedad .....	55
Gráfico 11. Poder calorífico en función del porcentaje de carbono elemental.....	56
Gráfico 12. Poder calorífico en función del porcentaje de hidrógeno elemental .....	56
Gráfico 13. Poder calorífico en función del porcentaje de nitrógeno elemental .....	57
Gráfico 14. Poder calorífico en función del porcentaje de azufre elemental. ....	57

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Cuarteo de la muestra de cascarilla de nuez de palmiste.....	83
ANEXO B. Raquis de palma africana.....	84
ANEXO C. Cuarteo de la muestra de raquis de palma africana .....	85
ANEXO D. Mezclas con mayor porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste.....	86
ANEXO E. Mezclas con mayor porcentaje de raquis .....	87
ANEXO F. Analizador Elemental (SERIES II CHNS/O ANALYZER 2400) .....	88
ANEXO G. Bomba calorimétrica .....	89
ANEXO H. Norma para determinación de humedad.....	90
ANEXO J. Norma para determinación de cenizas .....	91
ANEXO K. Norma para determinación composición elemental .....	92
ANEXO L. Norma para determinar poder calorífico.....	93
ANEXO M. Poder calorífico cascarilla de nuez de palmiste .....	94
ANEXO N. Poder calorífico raquis de palma africana .....	95
ANEXO P. Poder calorífico mezcla 90% de cascarilla de nuez de palmiste .....	96
ANEXO Q. Poder calorífico mezcla 80% cascarilla de nuez de palmiste .....	97
ANEXO R. Poder calorífico mezcla 70% cascarilla de nuez de palmiste .....	98
ANEXO S. Poder calorífico mezcla 60% cascarilla de nuez de palmiste.....	99
ANEXO T. Poder calorífico mezcla 50% cascarilla de nuez de palmiste.....	100
ANEXO U. Poder calorífico mezcla 40% cascarilla de nuez de palmiste .....	101
ANEXO V. Poder calorífico mezcla 30% cascarilla de nuez de palmiste .....	102
ANEXO W. Poder calorífico mezcla 20% cascarilla de nuez de palmiste. ....	103
ANEXO X. Poder calorífico mezcla 10% de cascarilla de nuez de palmiste. ....	104

## **MEZCLA DE CASCARILLA DE NUEZ DE PALMISTE Y RAQUIS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

### **RESUMEN**

Determinación del potencial energético de la mezcla de cascarilla de nuez de palmiste y raquis de la palma africana mediante una caracterización de composición elemental, proximal y poder calorífico.

Se trituro la cascarilla y el raquis, y se prepararon mezclas biomásicas homogenizadas, resultando 9 tipos de muestras en distintas concentraciones de 10 a 90% de cascarilla. Se realizó los análisis de caracterización de las mezclas obtenidas, mediante ensayos normalizados British Standard.

Los resultados de la caracterización se relacionaron con el porcentaje de cascarilla, obteniendo modelos matemáticos. Con el software SPSS 19 se realizó una regresión lineal múltiple entre composición elemental, proximal, y poder calorífico, obteniendo una ecuación para determinar el poder calórico como una función de estas variables. Con los datos de producción de la planta, se cuantificó la cantidad de recurso biomásico disponible y el potencial energético en megavatios en la empresa AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales).

Se concluye que la mezcla con alta calidad energética corresponde a 40,63% de cascarilla y 59,37% de raquis con un poder calórico de 18.504,34 KJ/kg; lo que determina que con el recurso biomásico disponible se tiene un potencial energético correspondiente a 17,4 MW en un proceso de combustión directa.

**PALABRAS CLAVES:** /BIOMASA/ BIOCOMBUSTIBLES / CARACTERIZACIÓN FISICO  
QUÍMICA/PODER CALÓRICO/RESIDUOS AGRÍCOLAS/PALMA AFRICANA/  
/POTENCIAL ENERGÉTICO/

## **MIXTURE OF PALM OIL WALNUT HUSK AND PALM OIL RACHIS AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR ELECTRIC GENERATION**

### **ABSTRACT**

Determination of energetic potential of a mixture between palm oil walnut husk and palm oil rachis through an elemental, ultimate and calorific power analysis.

The palm oil walnut husk and palm oil rachis were pulverized, and homogenized biomass mixtures were made obtaining 9 types of samples with different concentrations since 10% up to 90% of walnut husk.

The characterization results were linked with the walnut husk concentration, getting mathematical models. SPSS 19 software was used in order to make a multiple linear regression between the elemental and ultimate composition with calorific power, obtaining an equation to determine the calorific power as a function of these variables. AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales) plant production data were used to quantify the available amount of biomass resource, and to get the energetic potential in megawatts.

From the results, it was concluded that the high quality energetic mixture corresponding to 40,63% of walnut husk and 59,37% of palm oil rachis has a calorific power of 18.504, 34 KJ/kg. It determines that using the available biomass resource, it has an energetic potential of 17,4 MW.

**KEYWORDS:** / BIOMASS/ BIOFUELS/ PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION/  
CALORIFIC POWER / AGRICULTURAL WASTES / AFRICAN PALM/ ENERGETIC  
POTENTIAL /



## INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en el país y en nivel mundial, se ha incrementado notablemente durante las últimas décadas, lo que ha desencadenado un sinnúmero de cambios en el medio ambiente con tal de satisfacer esta gran necesidad creada por un crecimiento alarmante de la población mundial, conjuntamente con el uso de combustibles fósiles en las termoeléctricas para satisfacer la cantidad de energía demandada, los efectos en el cambio climático han aumentado.

Debido a esto, en varios países del mundo, tales como Malasia y Alemania, se está desarrollando como una nueva opción al uso de petróleo, el uso de biomasa para generación de energía por ser una fuente renovable y de gran abundancia como en el país, diversificando así la matriz energética, reduciendo las emisiones de gases contaminantes y aprovechando al máximo los recursos. Con esta finalidad se ha evaluado las tecnologías de fuentes de energía renovable no hidroeléctricas; en bioenergía la generación de electricidad con residuos agrícolas, como la cascarilla de arroz y palmiste es una opción real, por lo tanto, puede convertirse en una energía de base y apoyo a la hidroelectricidad.

El continuo crecimiento de las ciudades y de sus habitantes exige que en la actualidad dispongamos de nuevas fuentes de generación de energía a parte de la hidroeléctrica y del uso de combustibles fósiles para satisfacer dicha demanda. Dentro de estos, está el uso de biomasa para generación eléctrica, específicamente los desechos agrícolas de procesamiento de ciertas industrias como la del procesamiento de palma africana, que hasta no muy pocos años, eran considerados como algo inservible y que por su abundancia a lo largo de cada año de producción, provocaban un alto índice de contaminación.

Una de las industrias que más genera desechos procedentes de la utilización de biomasa como materia prima para sus actividades, son las extractoras de aceite de palma y de palmiste como la extractora de aceite de palmiste AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales), ubicada en el Km 196 de la vía Santo Domingo- Quinindé, sector el Limón, utiliza aproximadamente 20000 Toneladas de nuez de palmiste al año para la extracción de aceite del cual el 60 % , es decir, 10800 Toneladas corresponden a la cascarilla de nuez <sup>[1]</sup>, por lo que este recurso sin duda representa un capital muy valioso al cual se le debe dar una aplicación que genere no solo ventajas medioambientales tras su utilización, sino ventajas económicas.

Una de las aplicaciones es realizar un estudio acerca de la mezcla conformada por cascarilla de nuez de palmiste y raquis como un combustible alternativo para generación eléctrica, ya que es una forma de contribuir al proceso de diversificación de la matriz energética del país, mediante el uso de biocombustibles no tradicionales, además representaría para la empresa AEXAV una forma de ahorrar dinero, al usar sus propios desechos procedentes del proceso, para generar y abastecer su consumo de energía en su actividad diaria.

En la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, se encuentra una investigación acerca del uso de biomasa como fuente alternativa de generación de energía, se puede citar el trabajo realizado por P. Ramírez <sup>[2]</sup>. En el país, en un ámbito mas profundo de la generación de energía con desechos agrícolas podemos citar la investigación de R. Narváez <sup>[3]</sup>.

Estas investigaciones han arrojado resultados que contemplan el potencial energético de la biomasa para ser considerada como un combustible alternativo, pero no se establece la posibilidad de realizar mezclas entre distintos desechos agrícolas y usarlas con el fin de maximizar la producción de electricidad.

Este trabajo de tesis propone encontrar la cantidad de energía generada por una mezcla entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis, y así aprovechar de forma óptima la biomasa disponible por parte de la empresa AEXAV.

Para la caracterización física y química de la cascarilla de palmiste y del raquis, así como de las distintas mezclas conformadas por ambos componentes, se realizaron los ensayos establecidos en normas BS (British Standard) para combustibles sólidos entre los cuales están: Porcentaje de Cenizas, Porcentaje de Humedad, Análisis de Composición Elemental, Poder Calórico Bruto.

Con los resultados obtenidos se estableció relaciones entre humedad, porcentaje de cenizas y composición elemental con el porcentaje de cascarilla usada. Conjuntamente con esta relaciones se estableció mediante una regresión lineal múltiple, una función que integre todas las variables analizadas, para finalmente determinar el potencial energético en MW por la cantidad de cascarilla de nuez y raquis disponibles en la empresa.

De los resultados se pudo concluir que la mezcla conformada por 40,63% de cascarilla y 59,37% de raquis tiene un poder calorífico de 18504,34 kJ/kg, y al utilizar la cantidad de recurso biomásico disponible en la empresa AEXAV el potencial es de 17,4 MW.

## **1. BIOMASA**

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

La forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y la de arroz. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente <sup>[4]</sup>.

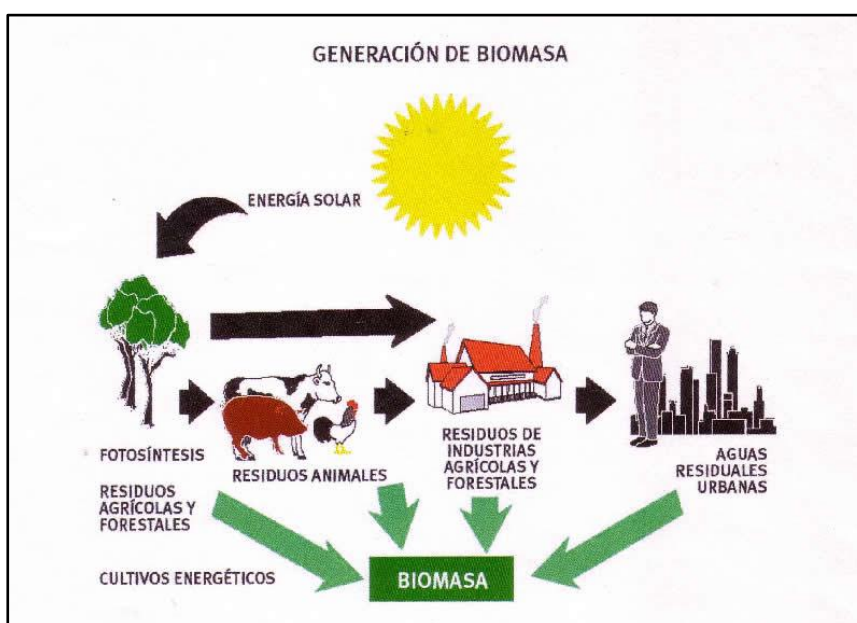
### **1.1. Recurso Biomásico**

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis <sup>[5]</sup>, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc; por eso, los correspondientes aspectos de

infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de estos residuos <sup>[6]</sup> son de carácter orgánico, se puede llegar a comprender el hecho de que las grandes cantidades de residuos que no se aprovechan y contaminan el ambiente puedan constituir un enorme potencial para la producción de energía.



**Figura 1. Generación de recursos biomásicos**

## 1.2. Clasificación de la biomasa

Existen una multitud de criterios y nomenclaturas utilizadas para clasificar a la biomasa dentro de los varios tipos existentes. Generalmente se clasifica a la biomasa de acuerdo a como se obtiene o al uso final que se le va a dar.

**1.2.1. Modo en que se obtiene.** De acuerdo al modo que se obtiene la biomasa se puede clasificar en biomasa primaria y biomasa secundaria. La biomasa primaria es aquella que se obtiene directamente de un ecosistema natural para su utilización energética. La biomasa secundaria, también llamada residual, es aquella que se obtiene como residuo o subproducto de alguna actividad humana.

**1.2.2. Uso final.** Según este criterio, los tipos de biomasa están destinados principalmente a la producción de energía mediante distintos procesos, por lo tanto se han clasificado en:

**1.2.2.1. Biocombustibles sólidos.** Proviene directamente de cultivos energéticos, es decir, cultivos destinados a la producción de energía. Proviene de procesos agrícolas y de procesamiento de madera y/o agroalimentarias. Aunque una parte importante de los biocombustibles sólidos se utilizan directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, la utilización energética moderna de los biocombustibles sólidos requiere un acondicionamiento especial para su uso como combustible. Las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustibles son: astillas, serrín, pelets y briquetas (los dos últimos suponen un proceso de densificación del material molido previamente).



**Figura 2. Residuos biomásicos como biocombustibles sólidos**

**1.2.2.2. Biomasa residual húmeda.** Con alto contenido de humedad, por su procedencia y composición, la materia orgánica es degradable mediante procesos bioquímicos. Se trata generalmente de flujos líquidos, aunque es posible que se den en estado semisólido. El biogás generado a partir de procesos de degradación de la materia orgánica de la biomasa residual húmeda se puede utilizar directamente como combustible en las industrias, o como combustible principal para la generación de energía eléctrica, al hacer funcionar las turbinas que se encuentran acopladas a generadores eléctricos.

Un caso práctico de la utilidad de este tipo de biomasa, es el proyecto de recuperación del vertedero de Valdemin Gómez en Madrid, España, en el cual, en una superficie de 110 hectáreas se formó una colina de 30 m de altura, acumulando 21.3 millones de toneladas de basura durante un período de 22 años. El proyecto consiste en la utilización del biogás generado en el vertedero, con lo cual se prevé la generación de 1,145 GWh <sup>[7]</sup>.

**1.2.3. Cultivos Energéticos.** Son grandes plantaciones o cultivos con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años.

También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación. Se debe considerar a los cultivos energéticos de manera diferente a la biomasa residual agrícola por dos razones principales. Primero, los cultivos energéticos son especies eminentemente forestales (eucalipto, frondosas, etc) y segundo, por que existen implicaciones en el manejo de los mismos que hacen que las prácticas agronómicas no se orienten a la calidad del producto, sino mas bien a la maximización en la recuperación de la energía invertida.

Las denominadas “granjas energéticas” pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura y logrando importantes beneficios ambientales. Las comunidades rurales pueden ser, entonces, energéticamente auto suficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad <sup>[8]</sup>.

**1.2.3.1. Clasificación de los cultivos energéticos.** Se pueden clasificar según su uso final al que será destinada la biomasa obtenida. Por lo tanto se tiene:

- ***Producción de biocombustibles sólidos.*** Para la producción de calor y/o electricidad. En este caso se buscan especies que generen gran cantidad de biomasa lignocelulósica (madera, paja, etc.) como cultivos herbáceos o cultivos forestales.
- ***Producción de biocarburantes de primera generación para automoción.*** Las especies oleaginosas se utilizan para la obtención de biodiesel <sup>[9]</sup>, mientras que aquellas con un importante porcentaje de azúcar se destinan a la elaboración de bioetanol y sus derivados.

### **1.3. Tipos de biomasa**

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular <sup>[10]</sup>. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc. El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Estados típicos de la biomasa**

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrín: corteza, aserrín, astillas.	Polvo sólido Humedad Relativa > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas.	Polvo sólido Humedad Relativa 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza y raíces.	Sólido Humedad Relativa > 55%
Residuos Agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, alto contenido de humedad
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)	Polvo Humedad Relativa < 25%
Residuos Industriales	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado, grasas y aceites vegetales	Líquido, grasoso
Residuos Urbanos	Aguas negras	Líquido
	Basura orgánica (madera)	Sólido, alto contenido de humedad

**Fuente:** Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central (FOCER), Manuales Sobre Energía Renovable, Biomasa. San José, Costa Rica, 2002, p.10.

#### **1.4. Residuos de palma africana**

**1.4.1. Palma africana y palmiste.** Los frutos de la palma aceitera son carnosos y forman un racimo. Estos racimos son cultivados y llevados a las plantas extractoras de aceite donde después de varios procesos físicos y químicos se logra extraer el aceite. Algunos de los subproductos generados en el proceso son utilizados como fuente de extracción de un aceite más fino, el aceite de palmiste. El palmiste es la semilla extraída del fruto de palma, conocida como almendra, esta es triturada para extraer el aceite de palmiste, quedando así un residuo sólido conocido como cascarilla o cuesco de nuez de palmiste. El cuesco posee una alta resistencia mecánica, dureza y de bajo peso. Esta se puede usar como combustible en las calderas o para adecuación del mantenimiento de las vías internas de las plantaciones.



**Figura 3 Fruto de palma africana**

**1.4.2. Raquis.** Es el racimo que sostiene a los frutos de la palma africana. De gran contenido de humedad y con residuos de aceite propio de los frutos, posee una estructura dura e impenetrable, difícil de cortar. Tiene un gran tamaño y un tronco sólido para soportar el gran peso debido a la cantidad de frutos. Su principal uso es como abono para las propias instalaciones, no se han encontrado registros de su utilización como fuente de energía aquí en el país, aunque en Europa se conoce que se utiliza para la obtención de bioetanol o biogás.



**Figura 4. Raquis residual de la extracción de aceite de palma**

La producción de estos residuos por parte de la empresa AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales), se resumen en la siguiente tabla proporcionada por el Ingeniero Pablo Begnini Gerente General de la empresa AEXAV:



**Tabla 2. Datos producción y residuos de palmiste extractora AEXAV**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Superficie de producción de fruta de palma	ha	5000
Cantidad de fruta de palma procesada	Tm/año*ha	16
Cantidad de nuez procesada	Tm/día	55
Contenido de aceite por Tm de fruta	%	16
Porcentaje de raquis presente en la cantidad despachada (fruta de palma)	%	22
Porcentaje de cascarilla presente en la nuez	%	60

### **1.5. Caracterización de la biomasa**

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por ser molesta para la instalación que la produce o porque entorpece las labores agrarias o ganaderas que la generan. Cuando esto ocurre, se está desperdiciando una fuente de energía importante, basta recordar que considerando que, por término medio, un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 kcal y que un litro de gasolina tiene aproximadamente 10.000 kcal, por cada tres kilogramos que desperdiciamos de biomasa, se desaprovecha el equivalente a un litro de gasolina.

La caracterización de la biomasa sirve para obtener una previsión del comportamiento de la biomasa ante las diferentes etapas involucradas en su uso como fuente de energía: obtención, transporte, tratamiento y conversión en energía. Las propiedades pueden clasificarse en físicas, químicas y energéticas <sup>[11]</sup>.

Existen una multitud de posibles propiedades y análisis a realizar. A continuación en la tabla 3 se presentan los principales parámetros que generalmente son motivo de estudio de la biomasa para caracterizarla como un combustible apropiado.

**Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa**

<b>Parámetros Físicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Densidad real y aparente</li> <li>➤ Humedad</li> <li>➤ Distribución granulométrica</li> </ul>	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pre tratamiento.
<b>Parámetros Químicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Análisis elemental</li> <li>➤ Análisis inmediato</li> <li>➤ Componentes estructurales</li> <li>➤ Composición de cenizas</li> </ul>	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica
<b>Parámetros Energéticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Poder Calórico</li> </ul>	Determina la cantidad de energía aprovechable

**Fuente:** NOGUÉS, Sebastian., Energía de la Biomasa, Volumen I, Editorial Pressas Universitarias, Zaragoza –España 2010, p. 41.

**1.5.1. Propiedades físicas.** Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede genera. Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar y dentro de estas tenemos algunas que son propiedades relacionadas al formato como la biomasa se presenta.

**1.5.1.1. Densidad Real y Aparente.** La densidad real es aquella propia de la materia, mientras que la densidad aparente tiene que ver con el modo como cada tipo de biocombustible sólido tiene a llenar un volumen, es decir, tiene en cuenta el volumen que ocupan sus poros abiertos o cerrados.

Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso. Cuando se presenta una densidad aparente baja, la densidad energética también es baja, por lo que en estos casos es necesario someter a procesos de densificación ya sea en forma de pellets o briquetas. <sup>[12]</sup>.

$$\rho_{real} = \frac{\text{masa de la partícula}}{\text{volumen de la partícula (sin poros)}} \quad (1)$$

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{masa de la partícula}}{\text{volumen de la partícula (con poros)}} \quad (2)$$

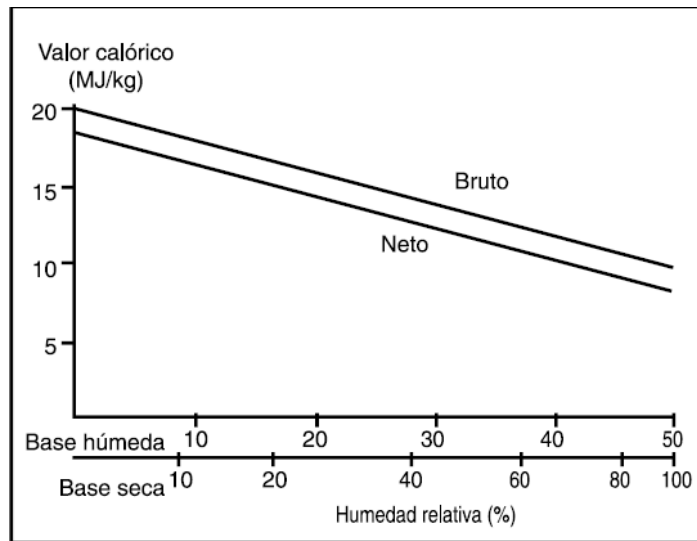
**1.5.1.2. Humedad.** Es la cantidad total de agua contenida en el total de masa de una muestra de biomasa, es decir, es el contenido de agua por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

**Tabla 4. Intervalos de humedad de algunos tipos de biomasa**

<b>Tipos de biomasa</b>	<b>Contenido de humedad, % peso</b>
Cortezas	25-75
Madera residual gruesa	30-60
Virutas	16-40
Serrín	25-40
Pasto empacado	10-15

**Fuente:** NOGUÉS, Sebastian., Energía de la biomasa, Editorial prensas universitarias, Zaragoza-España 2010, p. 43.

El contenido de humedad tiene un efecto importante en los procesos de pre tratamiento y en el proceso de combustión ya que disminuye el rendimiento de la misma (menores temperaturas en llama y absorbe parte de la energía liberada).



**Figura 5. Valor calórico en función de la humedad relativa**

Para determinar el contenido de humedad en una muestra se utiliza la siguiente ecuación <sup>[13]</sup>:

$$\% \text{ Hum} = \frac{(A - B)}{C} * 100 \quad (3)$$

Donde:

% Hum = Porcentaje de humedad en base húmeda.

A = Peso crisol + muestra húmeda

B = Peso crisol + muestra seca

C = Peso muestra húmeda

**1.5.1.3. Distribución granulométrica.** La reducción granulométrica consiste en conseguir un tamaño de partícula óptimo para la combustión mediante la trituración y posterior separación de las partículas con el tamaño deseado. El tamaño final alcanzado dependerá del tipo de tecnología de combustión que se vaya a utilizar. Es de vital importancia siempre reducir el tamaño de la biomasa para aumentar la superficie útil sobre la que se puedan dar las reacciones de oxidación.

**1.5.2. Propiedades Químicas.** Las propiedades químicas pueden referirse a los elementos que constituyen la biomasa (C, H, O, N, S). El contenido de cenizas (elementos inorgánicos) y su comportamiento son de vital importancia en la caracterización de los combustibles sólidos. Por otra parte, el análisis más sencillo de la biomasa como combustible consiste en determinar su análisis inmediato (carbón fijo, volátiles, cenizas).

**1.5.2.1. Composición elemental.** Este análisis permite establecer el porcentaje en peso de los principales constituyentes con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica como son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) <sup>[14]</sup>. Conocer esta información nos permite prever el comportamiento del combustible sólido en el proceso de combustión (facilidad de ignición, especies gaseosas producidas), además determinar la cantidad de aire preciso para su combustión. A partir de ciertas formulas empíricas, que partiendo del porcentaje en peso de sus elementos constituyentes, se puede obtener su contenido energético (poder calorífico).

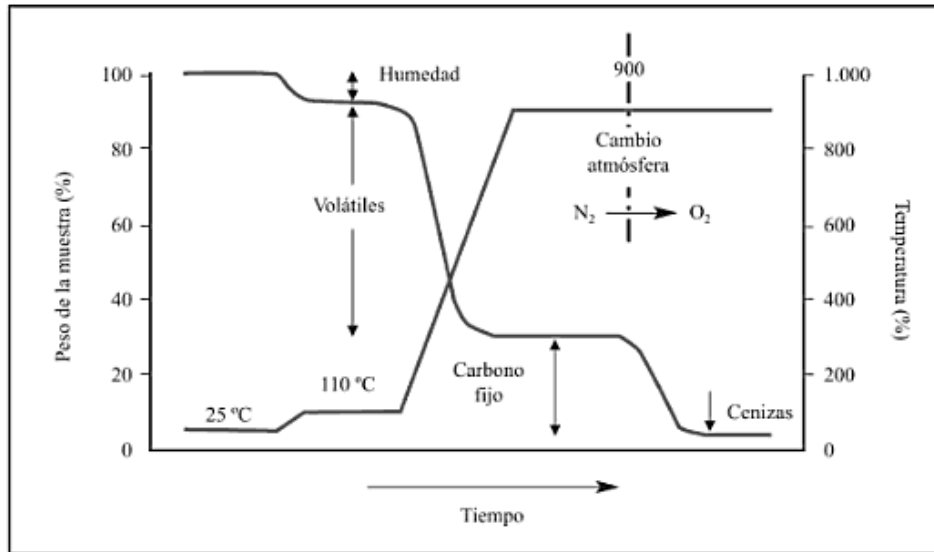
La biomasa es altamente oxigenada en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Típicamente, entre el 30%-40% en peso de la materia seca en la biomasa es oxígeno. El principal constituyente de la biomasa es carbón, formando así desde el 30 al 60% en peso de la materia seca dependiendo del contenido de cenizas. De los componentes orgánicos, el hidrógeno es el tercer mayor constituyente, conformando típicamente entre el 5-6% de la materia seca. El nitrógeno, azufre, y cloro pueden también ser encontrados en cantidades usualmente menores al 1% en la materia seca, pero ocasionalmente se encuentran por encima de este <sup>[15]</sup>.

**Tabla 5. Composición elemental de varios tipos de biomasa**

<b>Residuo</b>	<b>% Carbono</b>	<b>% Hidrógeno</b>	<b>% Oxígeno</b>	<b>% Nitrógeno</b>	<b>% Azufre</b>
Cáscara de fruta de palma	49.43	5.60	34.03	0.33	0
Nuez de palma	48.59	5.73	35.62	2.60	0.22
Cáscara de arroz	38.92	5.10	37.89	2.17	0.12
Semillas de uva	49.91	6.31	32.34	1.35	0.18
Cáscara de algodón	43.78	5.53	37.46	0.88	0.09

**Fuente:** Energy research Centre of the Netherlands (ECN). Base de datos de propiedades de biomasa. Fecha de consulta: Febrero 2014. En línea (2012) Disponible en web: <https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.

**1.5.2.2. Análisis Inmediato.** Este análisis permite determinar el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbón fijo expresados en porcentaje en peso. Básicamente este análisis sirve para determinar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbón fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas).



**Figura 6. Curva termogravimétrica para el análisis inmediato de combustibles sólidos**

- a) **Cenizas.** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. Las cenizas son los residuos inorgánicos que quedan tras la combustión del carbón fijo y varían en su composición y porcentajes de participación según la fuente de biomasa. Las cenizas reducen el poder calorífico del combustible y el rendimiento térmico de la caldera ya que bajan la temperatura de combustión al absorber calor e interferir entre el contacto entre combustible y comburente. Además como poseen puntos de fusión bajos, se funden y se depositan en las paredes del hogar formando escorias y reduciendo la cantidad de calor transferido en los tubos para generación de vapor. Para determinar el porcentaje de cenizas utilizaremos la siguiente ecuación <sup>[16]</sup>:

$$\%Cn = \frac{m_1 - m_c}{m_m} * 100 \quad (4)$$

Donde:

%Cn = Porcentaje de cenizas

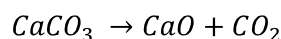
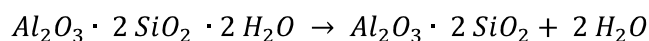
$m_1$  = Peso de cenizas + cápsula

$m_c$  = Peso de la cápsula

$m_m$  = Peso de la muestra

De entre las múltiples reacciones químicas que intervienen las principales son la deshidratación del caolín y del yeso, la disociación de los carbonatos y la oxidación de las piritas.

Las transformaciones químicas más importantes se representan al menos por las siguientes ecuaciones teóricas



- b) *Material Volátil.*** Es la porción de combustible que se libera en forma de vapores (hidrocarburos) y gases al descomponerse térmicamente la materia que configura la biomasa. Si existe oxígeno en el interior y alta temperatura, los volátiles se oxidan produciendo llama. La biomasa sólida tiene un alto contenido de volátiles (entre 60-80%) que pueden suponer más de dos terceras partes del poder como combustibles.

El contenido de volátiles constituye una importante propiedad que proporciona una indicación de su reactividad y facilidad de ignición. Para determinar el porcentaje de material volátil se utiliza la siguiente ecuación <sup>[17]</sup>:

$$\%M.V = A - B \quad (5)$$

Donde:

M.V= % materia volátil

A = % pérdida de peso

B = % humedad

$$A = \frac{C - D}{C} * 100 \quad (6)$$

Donde:

A = % pérdida de peso

C = peso de la muestra, g

D = peso de la muestra después del calentamiento, g

- c) *Carbón fijo.*** Es la parte del carbono del combustible que queda tras el proceso de devolatilización, es decir, es la cantidad de masa efectiva que puede quemarse como combustible después de la salida de volátiles. Permite estimar la cantidad de residuo carbonoso (coque) que queda tras la etapa de devolatilización, por tanto nos da una idea del tiempo de residencia necesario para obtener una combustión completa. El carbono fijo no coincide con el carbono elemental de la muestra determinado a partir del análisis elemental, ya que una parte del carbono elemental se libera en el proceso de devolatilización. Para determinar el porcentaje de carbón fijo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% C.F = 100 - \% Humedad + \% Cenizas + \% Volátiles \quad (7)$$

**Tabla 6. Análisis inmediato libre de humedad de algunos tipos de biomasa**

<b>Biomasa</b>	<b>Carbono fijo (% b.s)</b>	<b>Volátiles (% b.s)</b>	<b>Cenizas (%b.s)</b>
Residuo forestal	13.60	82.40	4.00
Chopo	24.20	73.00	2.80
Serrín de pino	14.40	85.00	0.60
Paja de trigo	17.71	75.27	7.02
Tallos de alfalfa	15.81	78.92	5.27
Paja de arroz	15.86	65.47	18.67
Cáscara de almendra	20.71	76.00	3.29
Huesos de oliva	16.28	82.00	1.72
Orujillo	21.30	72.40	6.30

**Fuente:** NOGUÉS, Sebastian., *Energía de la biomasa*, Editorial prensas universitarias, Zaragoza-España 2010, p. 132.

**1.5.2.3. Poder calorífico.** Representa la cantidad de calor generado por la combustión completa de una unidad de masa de dicho combustible en condiciones normalizadas (presión o volumen constante) considerando una temperatura de referencia de 25°C. Se mide en unidades de contenido energético por unidad de masa o volumen dependiendo del estado físico del combustible. Si es sólido por kilogramo, si es líquido por litro y por metro cúbico si es gaseoso.

Cuanto más altas sean las fracciones de humedad y de hidrógeno en el combustible sólido, mayor será la diferencia entre PCI (poder calorífico inferior) y PCS (poder calorífico superior). Para combustibles con alto contenido de humedad o hidrógeno, la diferencia entre PCI y PCS puede llegar a ser del orden del 10% <sup>[18]</sup>.

- **Poder calorífico superior.** El poder calorífico superior (PCS) es aquel que hace uso del calor latente del agua al condensarse en los gases de combustión.
- Al condensarse el agua, ésta pierde el calor latente de vaporización para enfriarse, cediendo esta energía a los gases del medio, por lo tanto, es la máxima cantidad de energía que se puede obtener en la combustión del combustible en la caldera, especialmente diseñada para ello.



- **Poder calorífico inferior.** El poder calorífico inferior (PCI) es el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua, es decir, el agua se encuentra en estado de vapor y no condensa. Se denomina inferior, porque parte de la energía de la combustión se consume para pasar el agua que esta en estado líquido a vapor, por lo que este es menor. El poder calorífico inferior resulta de restar el calor latente de vaporización del agua del poder calórico superior.

**Tabla 7. Poderes calóricos de residuos biomásicos**

COMBUSTIBLE	P.C.S APROXIMADO KJ/kg
Bagazo húmedo	10500
Bagazo seco	19200
Cáscara de cacahuete	17800
Cascarilla de arroz	13800
Celulosa	16500
Corteza escurrida	5900
Caña de azúcar	4600
Madera seca	19000
Paja seca de trigo	12500
Paja seca de cebada	13400
Serrín húmedo	8400
Viruta seca	13400
Cáscara de almendras	36800
Cáscara de nueces	32000
Cáscara de arroz	15300
Cáscara de pipa de girasol	17500
Cáscara de trigo	15800
Corteza de pino	20400
Corcho	20930
Orujillo de aceituna	17900
Papel	17500

**Fuente:** RAMIREZ, Paola. Elaboración de briquetas de carbón a partir de la cascarilla de nuez de palmiste. Trabajo de Grado. Ingeniera Química. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2012. p. 14-15.

Varios esfuerzos han sido realizados para correlacionar el valor del poder calórico con la composición elemental de la biomasa, similarmente a las correlaciones desarrolladas para el carbón. Una de las correlaciones es la de Gaur –Reed para el poder calorífico en condiciones estándar en MJ/Kg <sup>[19]</sup>:

$$Q_{h,o} = 0,3491 * C + 1,1783 * H + 0,1005 * S - 0,1034 * O - 0,0151 * N - 0,0211 * Cn \quad (8)$$

Donde C, H, S, N, O, y Cn son los porcentajes en peso en base seca de carbón, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno, y cenizas en la alimentación.

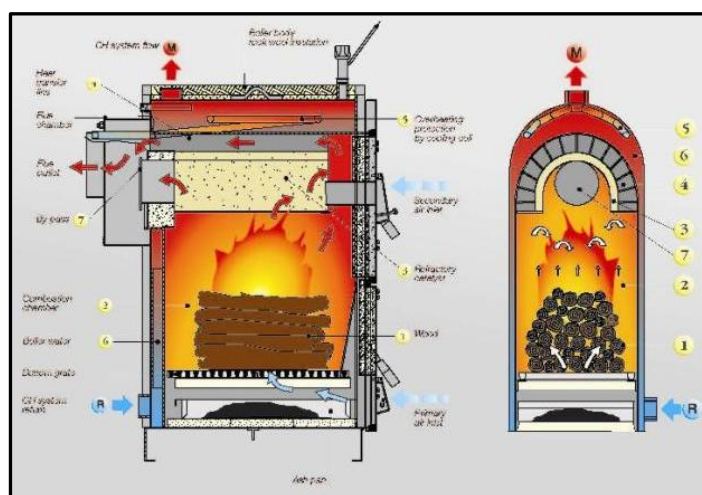
## 1.6. Usos de la biomasa.

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad.

En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

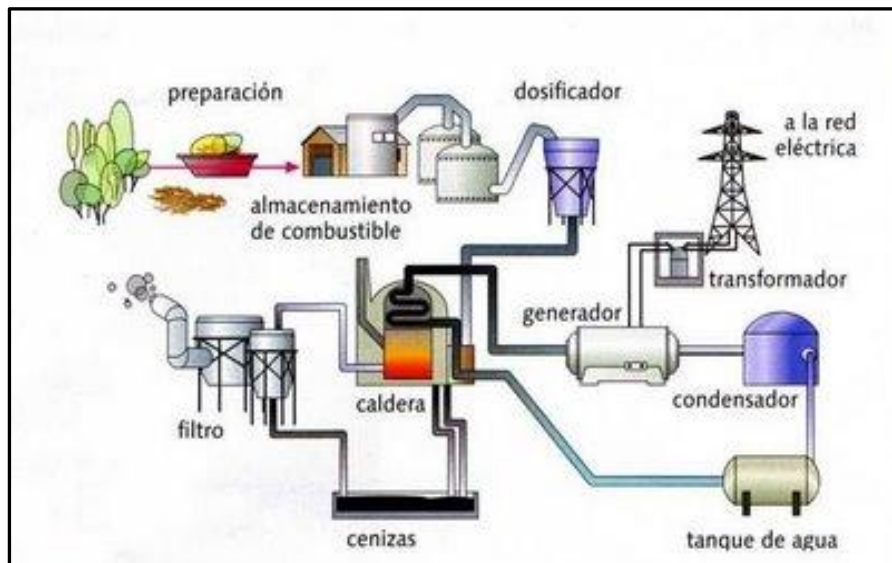
**1.6.1. Aplicaciones térmicas.** El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento está basado en la combustión de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido.

Los procesos domésticos han sido muy ineficientes, pues han presentado pérdidas normales de energía entre 30% y 90% de la energía. Aunque los usuarios tratan de mejorar las estufas, por lo general carecen de los recursos financieros y técnicos para hacerlo considerablemente <sup>[20]</sup>.



**Figura 7. Generación de calor por combustión de biomasa**

**1.6.2. Aplicaciones eléctricas.** Cuando se habla de generación de electricidad con biomasa se puede hablar de co-generación y generación. Co-generación se refiere a la generación simultánea de calor y electricidad, lo cual resulta considerablemente más eficiente que los dos sistemas separados. Se utiliza con frecuencia en industrias que requieren de las dos formas de energía, como el procesamiento de café y azúcar. Su configuración depende de cuál es la forma de energía más importante; a veces se utilizan el calor y la electricidad en el proceso de la planta industrial y se vende el excedente a otros usuarios o a la red eléctrica.



**Figura 8. Central eléctrica con biomasa**

La producción de electricidad a partir de biomasa sólida precisa de sistemas complejos, dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento <sup>[21]</sup>.

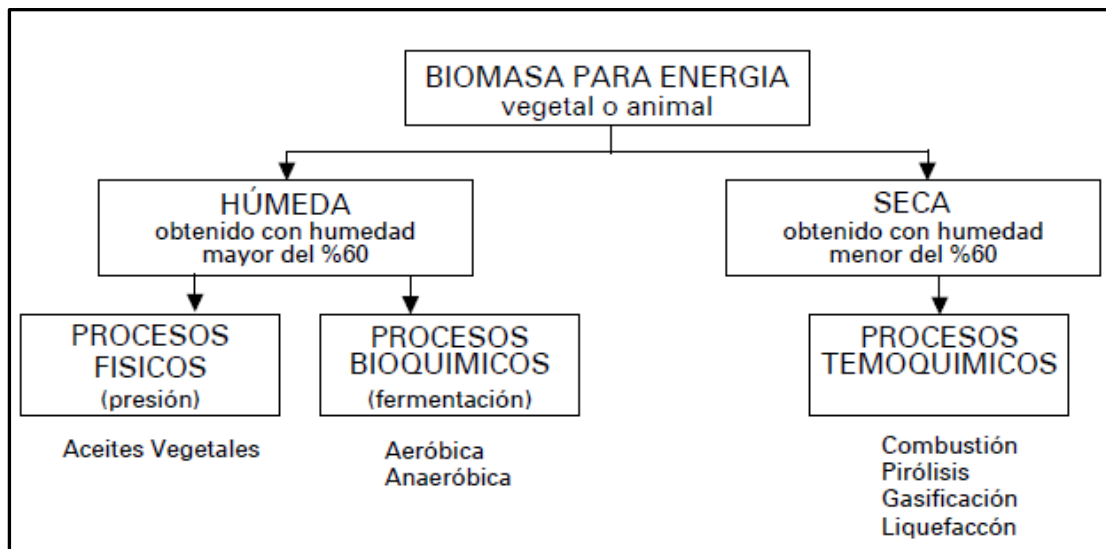
## **2. ENERGÍA DE LA BIOMASA**

La energía que se puede obtener de la biomasa proviene de la luz solar, la cual gracias al proceso de fotosíntesis, es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO<sub>2</sub> del aire y lo transforman en sustancias orgánicas. La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial, A pesar de ello, la biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro.

En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3000– 3500 kcal/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 2000 – 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO<sub>2</sub> generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, no aumenta la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Al contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años <sup>[22]</sup>.

Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos, que se destacan en la siguiente imagen:



**Figura 9. Tipos de biomasa y procesos para obtención de energía**

## 2.1. Procesos de conversión

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad. Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la cogeneración.

A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

- Procesos de combustión directa.
- Procesos termo-químicos.
- Procesos bio-químicos.

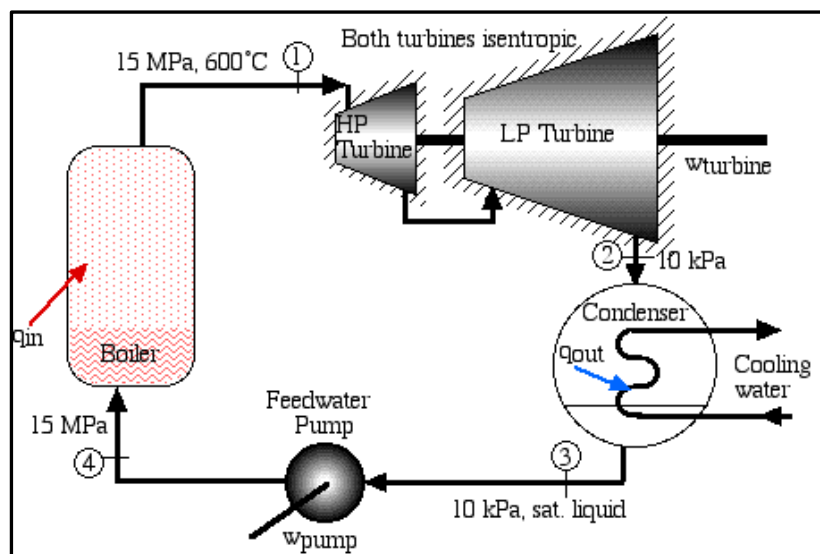
**2.1.1. Combustión directa.** Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas.

La producción de electricidad precisa de sistemas aún más complejos dado el bajo poder calorífico de la biomasa, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido en volátiles.

Para ello se necesitan centrales térmicas específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizara un combustible convencional, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento<sup>[23]</sup>.

**2.1.1.1. Generación Eléctrica.** La combustión de biomasa involucra un rango de tecnologías desde quemas a cielo abierto y estufas tradicionales para cocinar hasta hornos altamente controlados usados para la generación de energía y para aplicaciones del calor y energía combinados (CHP), que se conoce como cogeneración. La capacidad total instalada en la generación de energía con biomasa alrededor del mundo es aproximadamente 50000 MW, incluyendo la combustión de una larga escala de combustibles sólidos, así como también pequeños digestores a escala y aplicaciones de los gases de vertederos de basura.

El tipo más común de planta de generación usando biomasa como combustible hoy en día utiliza el ciclo de vapor convencional de Rankine.



**Figura 10. Esquema del ciclo de Rankine de una termoeléctrica**

El combustible es quemado en una caldera, la cual consiste de una cámara de combustión con uno o más intercambiadores de calor usados para generar vapor. Típicamente estas unidades de eficiencia media diseñadas para usar biomasa como combustible, generan vapor a temperaturas y presiones de entre 540 °C y 6-10 MPa, sin embargo los sistemas instalados incluyen presiones de hasta 17 MPa.

El vapor generado es expandido a través de una o más turbinas (o turbinas multi etapas) que manejan un generador eléctrico. En sistemas pequeños, motores reciprocantes y de tipo tornillos son usados en lugar de turbinas de vapor. El vapor agotado de la turbina es condensado, y el agua es recirculada hacia la caldera a través de bombas de alimentación.

Las incrustaciones del lado de los tubos en los supercalentadores de vapor y otros equipos de intercambio de calor en las calderas por las cenizas son una preocupación particular con los combustibles biomásicos, y los diseños de los grandes generadores incorporan frecuentemente sopladores de hollín para una limpieza intermitente <sup>[24]</sup>.

La tecnología de ciclo de vapor para generación eléctrica alcanza una mayor viabilidad económica en grandes plantas de cientos de megavatios, en las que las turbinas son mas eficientes y adquieren un óptimo índice de inversión/ rendimiento. Así mismo, los costes de operación y mantenimiento y el costo específico de combustible se reducen considerablemente. Sin embargo la baja densidad energética de la biomasa encarecen los costos de recolección y transporte, lo que determina que la cantidad del combustible disponible de forma económicamente viable sea limitada para estas grandes plantas.

Por ello, la producción de electricidad con biomasa debe llevarse a cabo en plantas relativamente de pequeño tamaño, fuera del punto óptimo de eficiencia para la tecnología de ciclo de vapor. Esto puede observarse en la siguiente figura de costos de generación versus el tamaño de la planta <sup>[25]</sup>:

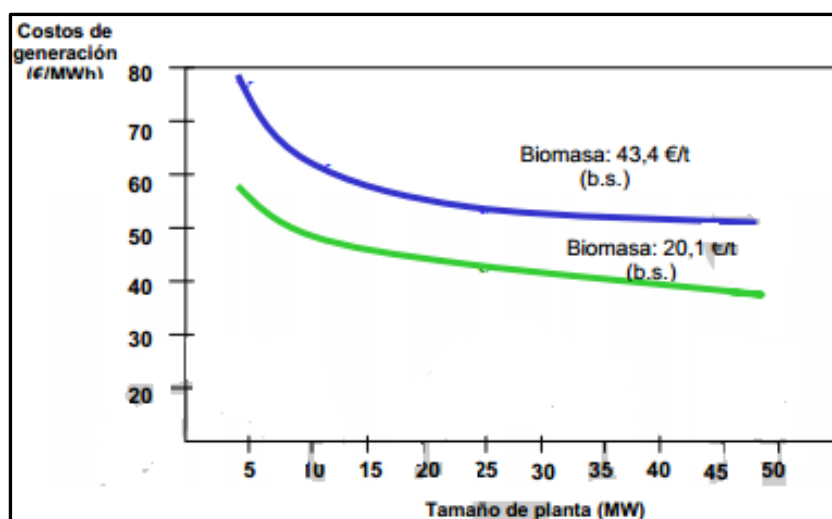


Figura 11. Costos de generación eléctrica versus tamaño de la planta (Unión Europea)

**2.1.2. Procesos termoquímicos.** Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte.

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido. El proceso básico se llama pirolisis o carbonización <sup>[26]</sup>.

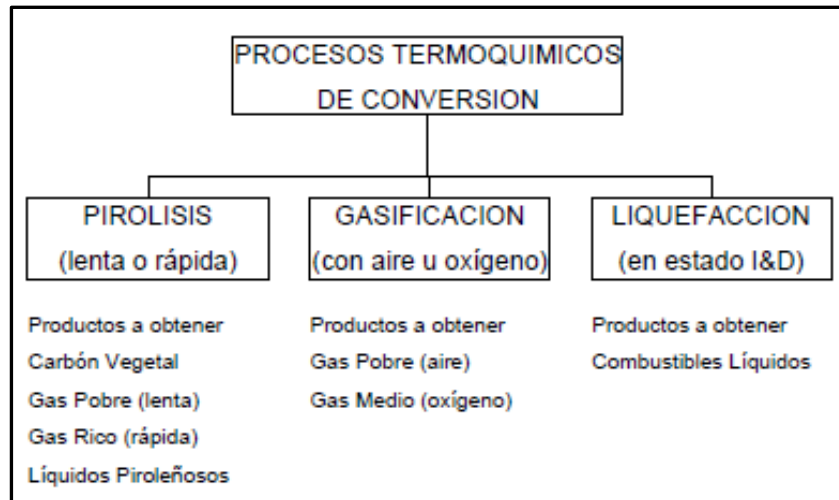


Figura 12. Clasificación de los procesos termoquímicos

**2.1.3. Procesos bioquímicos.** Los procesos bioquímicos se basan en la degradación de la biomasa por la acción de micro organismos para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos., y pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos).

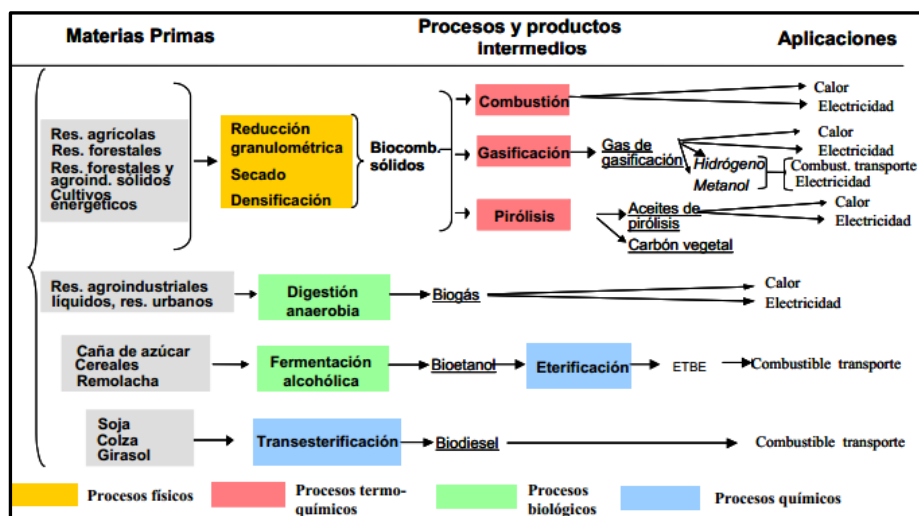


Figura 13. Procesos de conversión de la biomasa y aplicaciones de sus productos



## 2.2. Potencial energético de la biomasa.

El potencial energético se define como la cantidad de energía almacenada en la biomasa en su forma primaria y que es susceptible de ser usada en un proceso de transformación mediante combustión directa de la biomasa. El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación <sup>[27]</sup>:

$$PE_{BR} = \frac{1}{3153600} * A_c * P_{ah} * f_{BR} * PC_{BR} \quad (9)$$

Donde:

$PE_{BR}$  = Potencial energético de la biomasa residual (MW)

$A_c$  = Área cultivada

$P_{ah}$  = Producción materia prima por año y hectárea

$f_{BR}$  = Factor de biomasa residual del proceso

$PC_{BR}$  = Poder calorífico de la biomasa residual

**Tabla 8. Potencial Energético de residuos biomásicos**

Cultivo	Producción ton/año	Producto Energético	Producción P.E ton/año	PC KJ/kg	Potencial Energético MW
Caña de Azúcar	21'890.120	Bagazo	6'350.165	8895	1792
Algodón	123.611	Cáscara	24722	16747	131.29
Arroz	77.872	Cascarilla	19488	13900	8.58
Palma Africana	2'289472	Cascarilla	1'144.736	20515	744.68

**Fuente:** UPME (Unidad de Planeamiento Energético), Potenciales de Cultivos Energéticos, Documento N° ANC-631-03, Bogotá-Colombia, 2003, p. 99.

Además se sabe que la energía generada en la combustión de la biomasa es una función directa de su composición elemental ya que establece el poder calorífico de la misma, de la humedad que posee y del contenido de cenizas que esta deja tras su combustión, ya que influye en la transferencia de calor.

Dado que se dispone de una gran cantidad de residuos biomásicos, generalmente se realizan co-combustiones para obtener energía eléctrica, es decir, se utiliza los distintos tipos biomasa disponible como un combustible mixto, por lo que en realidad, la co-combustion de biomasa es la

combustión de una mezcla de combustibles sólidos en distintas proporciones para su aprovechamiento máximo.

Teniendo en cuenta esto, se convierte en una necesidad el poder establecer de manera matemática estas relaciones para poder predecir los valores de estas variables que influyen la generación de energía aprovechable, es decir, establecer de manera muy aproximada el poder calorífico de una mezcla de dos recursos biomásicos en distintas proporciones integrado todas las variables que lo afectan.

De esta forma, mediante una serie de regresiones simples entre estas variables se puede establecer su tendencia o la manera en que estas influyen ya sea de forma directamente proporcional o incluso de forma inversa al poder calorífico de la mezcla preparada y obviamente al potencial energético de la misma. Si las regresiones de este conjunto de variables anteriormente mencionadas presentan una tendencia lineal, es posible gracias a la estadística, realizar una regresión lineal multivariable que integre en una sola ecuación la influencia de las mismas en el poder calorífico de la mezcla biomásica utilizada, y haciendo uso de la ecuación número 11 se puede establecer el potencial energético de dicha mezcla.

### **2.3. Ventajas y desventajas del uso de biomasa con fines energéticos.**

#### **2.3.1. Ventajas del uso de biomasa.**

- Aunque para el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión, y el resultado de la misma sea agua y CO<sub>2</sub>, la cantidad de este gas causante del efecto invernadero, se puede considerar que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, que no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- Permite la introducción de cultivos de gran valor rotacional frente a monocultivos cerealistas.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles en países que no producen petróleo y adquieren derivados como fuel oil para sus termoeléctricas.
- Es un combustible mucho más barato que los combustibles fósiles, las cenizas que se producen son vegetales y pueden utilizarse como abono.

### ***2.3.2. Desventajas del uso de biomasa.***

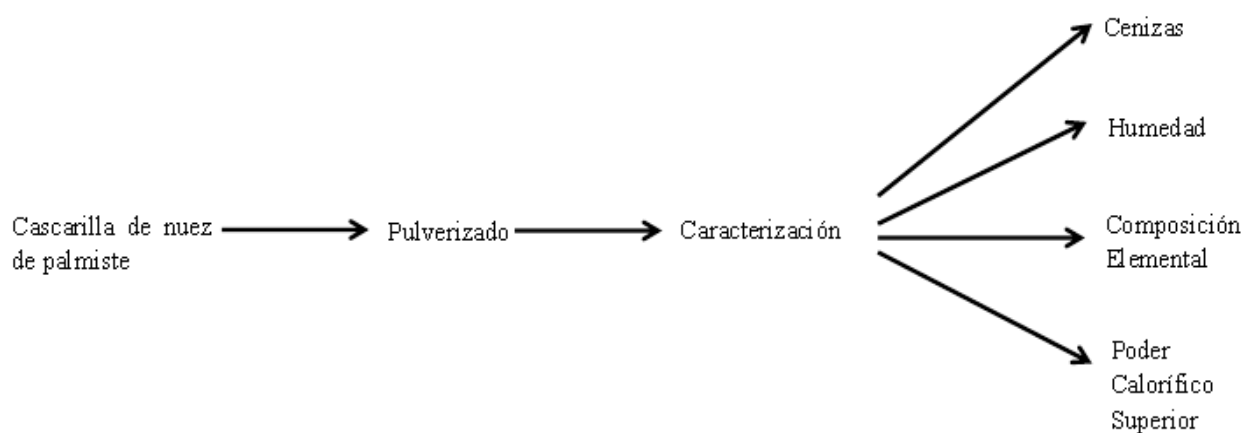
- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso debido al alto contenido de humedad de la biomasa.
- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente <sup>[28]</sup>.
- Los materiales biomásicos presentan también en su combustión problemas de emisiones de material particulado de pequeño tamaño que sobrepasan a los ciclones y hacen precisa en grandes plantas térmicas la utilización de filtros de mangas o electro filtros como elementos de limpieza adicionales. Sin embargo los gases no necesitan de un lavado, ya que el contenido de azufre de la biomasa es pequeño en comparación a los combustibles fósiles.
- La biomasa es costosa de obtener, principalmente la de tipo herbáceo, es un combustible de poca calidad, lo que repercute negativamente en los costos de inversión y mantenimiento de los equipos de conversión energética.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

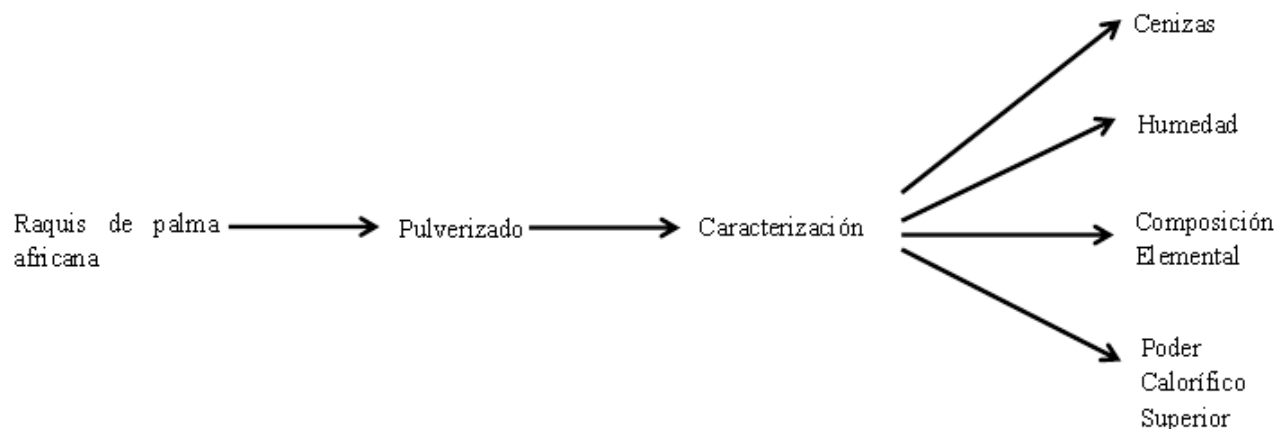
#### 3.1. Diseño experimental.

Para la caracterización de los residuos biomásicos procedentes de la extractora de palmiste y palma, se tomó las muestras de cascarilla de nuez de palmiste y raquis y se realizó el siguiente procedimiento.

##### 3.1.1. *Esquemas del proceso de caracterización de la cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana.*

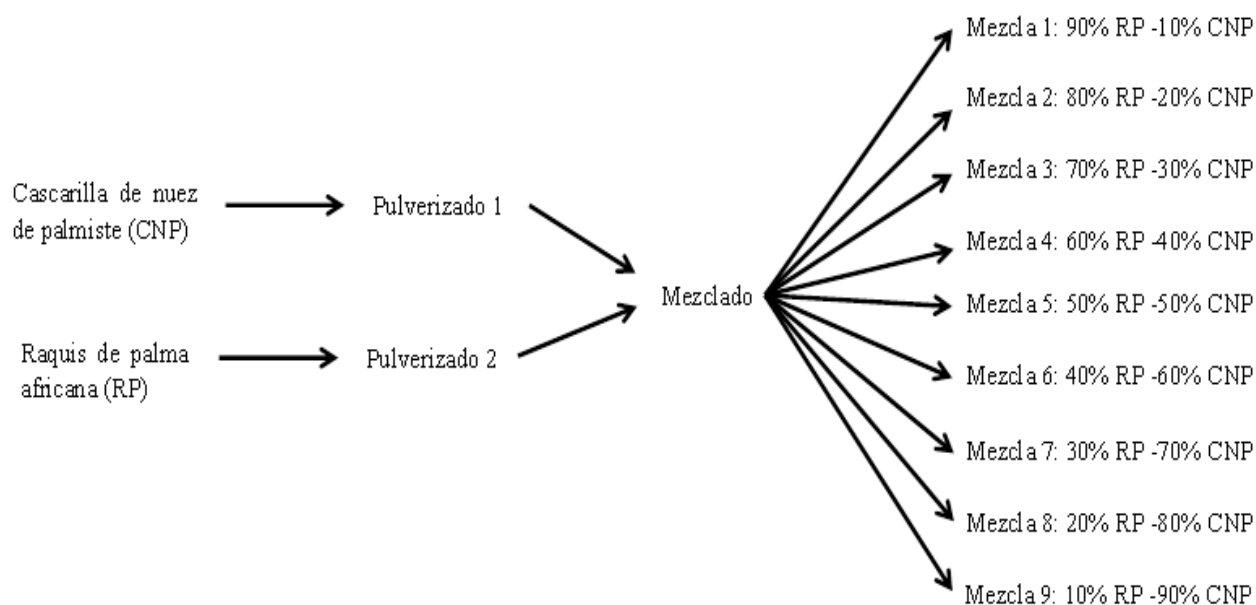


**Figura 14. Esquema del proceso de caracterización de la cascarilla de nuez de palmiste.**



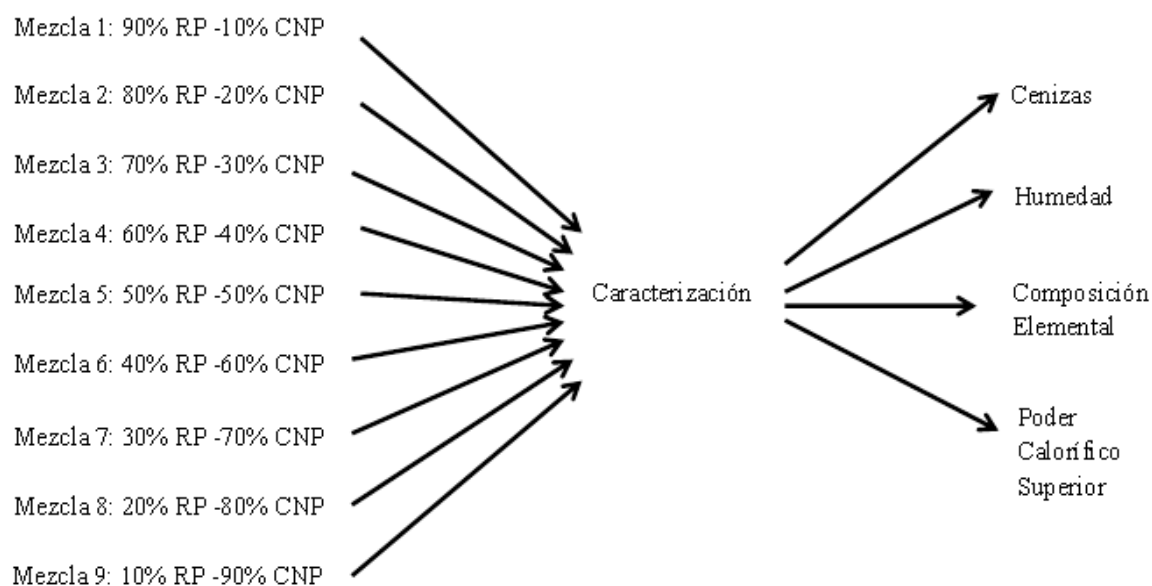
**Figura 15. Esquema del proceso de caracterización del raquis de palma africana**

**3.1.2. Esquema del proceso de preparación de mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana.**



**Figura 16. Esquema del proceso de preparación de mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana**

### 3.1.3. Esquema del proceso de caracterización de las mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana.



**Figura 17. Esquema del proceso de caracterización de las mezclas entre cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana.**

### 3.2. Descripción del diseño experimental

La metodología experimental aplicada ha considerado en primer lugar el uso de criterios de muestreo para la selección de las muestras potenciales a ser analizadas, tanto de cascarilla de nuez de palmiste como de raquis de palma africana, para finalmente someterlas a los ensayos propuestos, procurando mantener las condiciones más adecuadas de conservación de estos residuos biomásicos con el fin evitar alteraciones en los resultados obtenidos debido a la degradación de los mismos.

La cascarilla de nuez de palmiste y el raquis de palma africana fueron sometidos a un proceso de pulverización en un molino de cuchillas. En primera instancia se usó un molino de bolas para reducir el tamaño de la cascarilla de nuez e ingresar al molino de cuchillas. De igual forma los racimos de raquis fueron cortados antes de ingresar al molino de cuchillas.

Con la cascarilla de nuez de palmiste y el raquis de palma pulverizado, se realizó la preparación de las mezclas entre ambos componentes mediante relaciones de porcentaje en peso.

**Tabla 9: Proporciones de cascarilla de nuez de palmiste y raquis**

<b>Identificación</b>	<b>% Cascarilla Nuez Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>
MP1	90	10
MP2	80	20
MP3	70	30
MP4	60	40
MPR	50	50
MR1	40	60
MR2	30	70
MR3	20	80
MR4	10	90

Finalmente se procedió al proceso de caracterización de la cascarilla y el raquis pulverizado, así como de las mezclas preparadas.

Todos los procedimientos de caracterización se han realizado de forma normalizada mediante el uso de las normas de la British Standard, BS para combustibles sólidos.

### **3.3. Materiales y equipos.**

- Balanza Analítica OHAUS R = 0-210 g Ap.  $\pm 0,0001$  g
- Microbalanza Perkin Elmer R = 0-100 mg Ap.  $\pm 0,0001$  mg
- Molino de bolas
- Molino de cuchillas
- Crisoles tarados
- Cajas Petri
- Mufla
- Estufa
- Pinza para crisol
- Bomba Calorimétrica
- Analizador Elemental Capacidad: 60 muestras
- Mechero Fisher
- Espátula
- Cilindros de selenio
- Cuchillo dentado
- Espátula para microbalanza
- Pinza para cilindros de selenio

### **3.4. Sustancias y reactivos**

- Cascarilla de nuez de palmiste
- Raquis de palma africana

### **3.5. Procedimiento experimental**

#### ***3.5.1. Molienda y Pulverización***

- Moler la cascarilla de nuez de palmiste en un molino de bolas hasta conseguir un diámetro de partícula de 1 cm.
- Con un cuchillo dentado, cortar las ramas del raquis de palma hasta una longitud de 5 cm. Posteriormente cortar el tallo en pequeños cuadrados de 2 cm.
- Una vez terminada la molienda inicial de la cascarilla y el cortado del raquis, llevar estas muestras al molino de cuchillas para el proceso de pulverización donde se obtendrá un polvo muy fino.

#### ***3.5.2. Preparación de mezclas***

- Con la cascarilla y el raquis pulverizados, preparar las mezclas de acuerdo a los porcentajes establecidos en la tabla 9.
- El peso de cada mezcla a preparar es de 5g debido a que los análisis establecen que el peso de la muestra para los ensayos es de 1g.
- Colocar la cantidad de cascarilla y raquis de acuerdo a los porcentajes establecidos en una caja petri. Con ayuda de una espátula homogenizar la mezcla de ambos componentes.
- Colocar las mezclas preparadas en fundas ziploc para evitar su contacto con el ambiente y evitar humedecimiento de las muestras.

#### ***3.5.3. Análisis proximal (Porcentaje de humedad y cenizas)***

Se ha realizado el análisis proximal de la cascarilla de nuez de palmiste y el raquis de palma, así como de las mezclas preparadas en el Departamento de Petróleos Energía y Contaminación (DPEC) y en el laboratorio del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), mediante procedimientos establecidos para combustibles sólidos por la British Standard, BS. A continuación se presenta una lista de los procedimientos utilizados:



- PORCENTAJE DE HUMEDAD, se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en la norma BS <sup>[29]</sup> EN 14774-3:2009.
- PORCENTAJE DE CENIZAS, se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en la norma BS <sup>[30]</sup> EN 14775:2009

#### **3.5.4. *Análisis elemental (C, H, N, S)***

El análisis elemental de cada una de las muestras se realizó en el equipo SERIES II CHNS/O ANALYZER 2400 de la marca PERKINELMER en el laboratorio del Instituto de Eficiencia y Energías Renovables (INER). El procedimiento que se llevó a cabo en este equipo se basó en la norma BS <sup>[31]</sup> EN 15104:2011 y se detalla a continuación:

- Verificar las presiones en los manómetros de las líneas de suministro de gases hacia los equipos. Constatar que las presiones de aire, helio y oxígeno sean de 60, 20 y 15 psia respectivamente.
- Mediante el tablero de control verificar que la temperatura de la cámara de combustión este a 975 °C y a una presión de 116, 2 mm Hg.
- Antes de correr una muestra, realizar la purga de las líneas de gases de helio y oxígeno valiéndose de los códigos establecidos para ingresar en el software del equipo.
- Realizar una prueba de fugas antes de iniciar el análisis, tanto en la cámara de mezclado de gases, como en la cámara de combustión. Proceso que se detalla en el manual del equipo.
- Calibrar el equipo haciendo correr tres muestras consideradas como blancos. Los blancos son sustancias inorgánicas no detectables en el equipo pero que ayudan a la preparación de la cámara de combustión.
- A continuación, hacer la prueba mediante tres muestras estándar que contienen porcentajes de C, H, N, S definidos. Comparar los resultados obtenidos de los porcentajes de C, H, N, S dados por el equipo, y los que se encuentran establecidos en la etiqueta de los estándar. Si coinciden, el equipo está listo para ser utilizado con cualquier muestra de biomasa.

- Calibrar la micro balanza haciendo uso de una pesa patrón certificada de 100 mg. A continuación colocar en el plato de la derecha un cilindro de selenio sin muestra. En el plato izquierdo colocar un cilindro de selenio sin muestra y encerrar la microbalanza.
- Pesar de 3-5 mg de muestra seca en el cilindro de selenio. Con ayuda de una pinza doblar el cilindro de selenio y formar una pequeña bola procurando no romper el cilindro y evitar así pérdidas de muestra que afectarán el resultado final.
- Finalmente colocar la muestra en el analizador elemental. Seleccionar parámetros y pulsar el código 3 para muestra. Ingresar el peso de muestra a analizar y dar enter en iniciar análisis.
- Anotar los resultados obtenidos de C, H, N, S dados por el equipo. Estos resultados se muestran en porcentajes en peso de cada componente.
- Repetir el análisis dos veces tanto para la cascarilla de nuez de palmiste y raquis, como para las mezclas preparadas.
- Recordar que las muestras no deben contener humedad, por lo que deben ser previamente secadas en una estufa por lo menos durante 3 horas.

### **3.5.5. Poder Calorífico**

Este ensayo fue realizado por parte del personal técnico del laboratorio del Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación (DPEC). Fue realizado mediante la norma BS <sup>[32]</sup> EN 14918:2009 y a continuación se detalla el procedimiento:

- Pesar aproximadamente 1 g de muestra (cascarilla de nuez de palmiste, raquis y mezclas preparadas). Conectar el calorímetro a una fuente de 110 V.
- Regular en los manómetros de los tanques de oxígeno y aire a 300 KPa y 80 PSIA respectivamente.
- En el tablero del calorímetro seleccionar la opción Operación de Calorímetro, y verificar que exista agua en el reservorio del mismo, ubicado en la parte posterior.
- Seleccionar la opción calentador de bomba 3 en el tablero. Esperar que el equipo alcance una temperatura de 30 °C.

- Colocar el hilo de algodón de manera que este tome contacto con la muestra para realizar la combustión.
- Colocar la muestra pesada en la copa de combustión y cerrar el calorímetro.
- Introducir el peso de la muestra en el software del equipo y esperar aproximadamente 7 minutos para obtener el valor del poder calórico bruto.

#### 4. DATOS EXPERIMENTALES

##### 4.1. Mezclas de cascarilla de nuez de palmiste y raquis.

Tabla 10. Pesos de cascarilla de nuez de palmiste y raquis

Muestra	Peso muestra, g	% Cascarilla	% Raquis	Peso Cascarilla, g	Peso Raquis, g
MP1	7	90	10	6.3	0.7
MP2	7	80	20	5.6	1.4
MP3	7	70	30	4.9	2.1
MP4	7	60	40	4.2	2.8
MPR	7	50	50	3.5	3.5
MR1	7	40	60	2.8	4.2
MR2	7	30	70	2.1	4.9
MR3	7	20	80	1.4	5.6
MR4	7	10	90	0.7	6.3

##### 4.2. Caracterización proximal de la cascarilla, raquis y las mezclas preparadas.

###### 4.2.1. Datos para el ensayo de porcentaje de cenizas.

Tabla 11. Datos para el porcentaje de cenizas cascarilla de nuez de palmiste

Muestra	Peso Muestra, g	Peso Crisol, g	Peso Crisol + Cenizas, g
MPA	1.0053	22.8958	22.9279
MPB	1.0045	23.040	23.0719

**Tabla 12. Datos para el porcentaje de cenizas raquis de palma africana**

<b>Muestra</b>	<b>Peso Muestra, g</b>	<b>Peso Crisol, g</b>	<b>Peso Crisol + Cenizas, g</b>
MRA	1.0024	22.7755	22.8162
MRB	1.0042	26.2416	26.2822

**Tabla 13. Datos para el porcentaje de cenizas mezclas de cascarilla y raquis**

<b>Muestra</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>Peso Muestra, g</b>	<b>Peso Crisol, g</b>	<b>Crisol + Cenizas, g</b>
MP1-A	90	10	1.0011	22.7620	22.7944
MP1-B	90	10	1.0025	22.6400	22.6729
MP2-A	80	20	1.0120	23.0380	23.0718
MP2-B	80	20	1.0040	22.7580	22.7915
MP3-A	70	30	1.0023	22.6375	22.6720
MP3-B	70	30	1.0017	22.8869	22.9215
MP4-A	60	40	1.0151	22.3888	22.4247
MP4-B	60	40	1.0173	24.6918	24.7279
MPR-A	50	50	1.0131	24.6920	24.7285
MPR-B	50	50	1.1647	24.3890	24.4309
MR1-A	40	60	1.0141	22.6379	22.6755
MR1-B	40	60	1.0730	22.8871	22.9263
MR2-A	30	70	1.0034	21.7483	21.7855
MR2-B	30	70	1.0014	26.2415	26.2798
MR3-A	20	80	1.0090	22.762	22.8008
MR3-B	20	80	1.0200	23.040	23.0795
MR4-A	10	90	1.0013	22.6366	22.6762
MR4-B	10	90	1.0012	22.9556	22.9950

#### **4.2.2. Datos para el porcentaje de humedad.**

**Tabla 14. Datos para el porcentaje de humedad cascarilla de nuez de palmiste**

<b>Muestra</b>	<b>Muestra, g</b>	<b>Crisol, g</b>	<b>Crisol + Muestra, g</b>	<b>Crisol + Muestra seca, g</b>
MPA	1.0006	28.717	29.7176	29.6652
MPB	1.0015	43.0369	44.0384	43.9857

**Tabla 15. Datos para el porcentaje de humedad raquis de palma africana**

<b>Muestra</b>	<b>Muestra, g</b>	<b>Crisol, g</b>	<b>Crisol + Muestra, g</b>	<b>Crisol + Muestra seca,g</b>
MRA	1.0000	28.3192	29.3192	29.2564
MRB	1.0003	27.434	28.4343	28.3698

**Tabla 16. Datos para el porcentaje de humedad mezclas cascarilla y raquis**

<b>Muestra</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>Muestra (g)</b>	<b>Crisol (g)</b>	<b>Crisol +Muestra (g)</b>	<b>Crisol + Muestra seca (g)</b>
MP1-A	90	10	1.0001	27.4960	28.4961	28.4358
MP1-B	90	10	0.9915	29.6504	30.6419	30.5812
MP2-A	80	20	1.0001	39.1024	40.1025	40.0436
MP2-B	80	20	1.0010	43.8319	44.8329	44.7740
MP3-A	70	30	1.0011	27.4338	28.4349	28.3801
MP3-B	70	30	0.9933	43.0359	44.0292	43.9706
MP4-A	60	40	1.0014	28.7160	29.7174	29.6632
MP4-B	60	40	0.9944	29.6496	30.6440	30.5885
MPR-A	50	50	0.9865	38.7962	39.7827	39.7313
MPR-B	50	50	1.0001	35.5323	36.5324	36.4790
MR1-A	40	60	1.0006	28.3183	29.3189	29.2675
MR1-B	40	60	0.9970	27.4952	28.4922	28.4395
MR2-A	30	70	1.0003	47.3925	48.3928	48.3420
MR2-B	30	70	0.9905	42.3035	43.2940	43.2445
MR3-A	20	80	1.0005	37.2180	38.2185	38.1705
MR3-B	20	80	1.0063	43.3382	44.3445	44.2972
MR4-A	10	90	1.0011	41.5945	42.5956	42.5486
MR4-B	10	90	1.0001	40.4317	41.4318	41.3857

#### 4.3. Caracterización elemental cascarilla de nuez de palmiste, raquis y mezclas preparadas.

**Tabla 17. Composición elemental cascarilla de nuez de palmiste**

Muestra	Peso Muestra, mg	% C	% H	% N	% S	% O
MPA	3.255	50.500	6.190	0.840	0.350	42.120
MPB	3.600	50.140	6.200	0.830	0.350	42.480

**Tabla 18. Composición elemental raquis de palma africana**

Muestra	Peso Muestra, mg	% C	% H	% N	% S	% O
MRA	4.118	45.500	5.710	1.550	0.510	46.730
MRB	4.304	45.080	5.750	1.590	0.505	47.075

**Tabla 19. Composición elemental mezclas de cascarilla y raquis**

Muestra	% Palmiste	% Raquis	Peso Muestra, mg	%C	%H	%N	%S	%O
MP1-A	90	10	3.350	49.370	6.180	0.900	0.360	43.190
MP1-B	90	10	3.955	50.010	6.190	0.900	0.350	42.550
MP2-A	80	20	4.027	49.260	6.140	1.040	0.360	43.200
MP2-B	80	20	4.182	49.340	6.150	0.990	0.360	43.160
MP3-A	70	30	3.319	49.030	6.090	1.060	0.360	43.460
MP3-B	70	30	4.151	48.890	6.100	1.050	0.360	43.600
MP4-A	60	40	3.400	48.240	6.000	1.080	0.370	44.310
MP4-B	60	40	3.920	48.380	6.050	1.070	0.370	44.130
MPR-A	50	50	3.190	47.870	5.960	1.200	0.380	44.590
MPR-B	50	50	3.570	47.730	5.980	1.140	0.380	44.770
MR1-A	40	60	3.319	47.520	5.920	1.240	0.390	44.930
MR1-B	40	60	3.514	47.580	5.920	1.210	0.380	44.910
MR2-A	30	70	3.159	46.810	5.890	1.290	0.410	45.600
MR2-B	30	70	3.430	47.070	5.890	1.250	0.390	45.400
MR3-A	20	80	3.103	46.920	5.860	1.350	0.410	45.460
MR3-B	20	80	3.119	47.220	5.880	1.290	0.410	45.200
MR4-A	10	90	3.120	46.490	5.820	1.450	0.480	45.760
MR4-B	10	90	3.088	46.450	5.830	1.390	0.450	45.880

**4.4. Caracterización poder calorífico cascarilla de nuez de palmiste, raquis y mezclas preparadas.**

**Tabla 20. Poder Calorífico cascarilla de nuez de palmiste**

<b>Muestra</b>	<b>Peso muestra, g</b>	<b>Poder Calorífico, KJ/Kg</b>
MP	1,000	19250

**Tabla 21. Poder Calorífico raquis de palma africana**

<b>Muestra</b>	<b>Peso muestra, g</b>	<b>Poder Calorífico, KJ/Kg</b>
MR	1,000	17750

**Tabla 22. Poder Calorífico mezclas de cascarilla y raquis**

<b>Muestra</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>Poder Calorífico, KJ/Kg</b>
MP1	90	10	19130
MP2	80	20	19040
MP3	70	30	18990
MP4	60	40	18750
MPR	50	50	18640
MR1	40	60	18550
MR2	30	70	18490
MR3	20	80	18250
MR4	10	90	18100



## 5. PROCESAMIENTO DE DATOS

### 5.1. Cálculos para la caracterización proximal.

**5.1.1. Cálculo del porcentaje de cenizas.** Cálculo modelo para la cascarilla de nuez de palmiste para la muestra MPA. Se hace uso de la ecuación (4):

$$\%Cn = \frac{m_1 - m_c}{m_m} * 100$$

Donde:

%Cn = Porcentaje de cenizas

m<sub>1</sub> = Peso de cenizas + crisol

m<sub>c</sub> = Peso del crisol

m<sub>m</sub> = Peso de la muestra

$$\%Cn = \frac{22.9279 - 22.8958}{1.0053} * 100$$

$$\%Cn = 3.1931$$

Los resultados del porcentaje de cenizas tanto para la cascarilla de nuez de palmiste, raquis y de las mezclas de ambos componentes se presentan a continuación en las siguientes tablas. Estos resultados son valores promedios ya que el ensayo se repitió dos veces para cada muestra:

**Tabla 23. Porcentaje de cenizas para la cascarilla de nuez de palmiste**

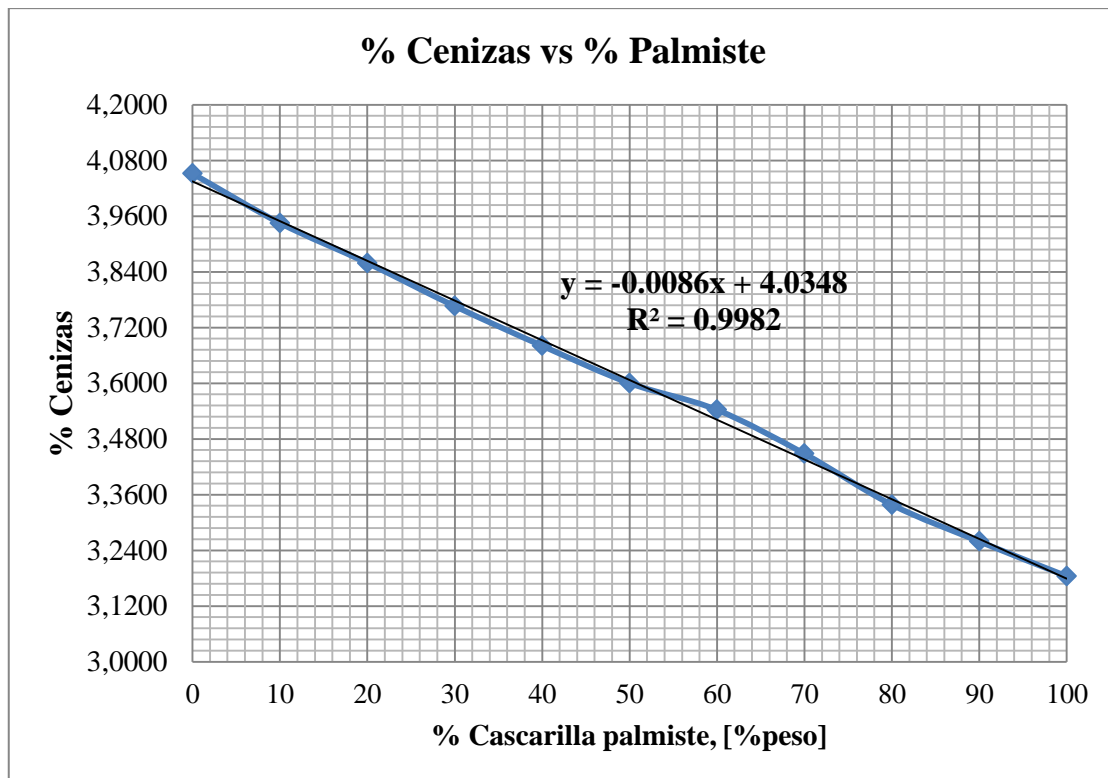
Muestra	% Cenizas	% Cenizas promedio
MPA	3.1931	3.1844
MPB	3.1757	

**Tabla 24. Porcentaje de cenizas para el raquis de palma africana**

Muestra	% Cenizas	% Cenizas promedio
MRA	4.0603	4.0516
MRB	4.0430	

**Tabla 25. Porcentaje de cenizas para las mezclas de cascarilla y raquis**

Muestra	% Palmiste	% Raquis	% Cenizas	% Cenizas Promedio
MP1-A	90	10	3.2364	3.2591
MP1-B	90	10	3.2818	
MP2-A	80	20	3.3399	3.3383
MP2-B	80	20	3.3367	
MP3-A	70	30	3.4421	3.4481
MP3-B	70	30	3.4541	
MP4-A	60	40	3.5366	3.5426
MP4-B	60	40	3.5486	
MPR-A	50	50	3.6028	3.6001
MPR-B	50	50	3.5975	
MR1-A	40	60	3.7077	3.6805
MR1-B	40	60	3.6533	
MR2-A	30	70	3.7074	3.7660
MR2-B	30	70	3.8246	
MR3-A	20	80	3.8454	3.8590
MR3-B	20	80	3.8725	
MR4-A	10	90	3.9549	3.9451
MR4-B	10	90	3.9353	



**Gráfico 1. Relación porcentaje de cenizas y porcentaje de cascarilla y raquis.**

De esta regresión, se obtiene la siguiente ecuación de una recta que relaciona el porcentaje cenizas tras la combustión y el porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste usada en la mezcla con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9982$  que nos indica que los datos se ajustan perfectamente al modelo.

**5.1.2. Cálculo del porcentaje de humedad.** Cálculo modelo para la cascarilla de nuez de palmiste para la muestra MPA. Se hace uso de la ecuación (3):

$$\% \text{ Hum} = \frac{(A - B)}{C} * 100\%$$

Donde:

%Hum = Porcentaje de humedad

A = Peso crisol + muestra húmeda

B = Peso crisol + muestra seca

C = Peso muestra húmeda

$$\%Hum = \frac{29.7176 - 29.6652}{1.0006} * 100$$

$$\%Hum = 5.2369$$

Los resultados del porcentaje de humedad tanto para la cascarilla de nuez de palmiste, raquis y de las mezclas de ambos componentes se presentan a continuación en las siguientes tablas. Estos resultados son valores promedios ya que el ensayo se repitió dos veces para cada muestra:

**Tabla 26. Porcentaje de humedad para la cascarilla de nuez de palmiste**

Muestra	% Humedad	% Humedad promedio
MPA	5.2369	5.2495
MPB	5.2621	

**Tabla 27. Porcentaje de humedad para el raquis de palma africana**

Muestra	% Humedad	% Humedad promedio
MRA	6.2800	6.3640
MRB	6.4481	

**Tabla 28. Porcentaje de humedad para las mezclas de cascarilla y raquis**

Muestra	% Palmiste	% Raquis	% Humedad Base Húmeda	% Humedad Promedio Base Húmeda
MP1-A	90	10	5.3295	5.3475
MP1-B	90	10	5.3656	
MP2-A	80	20	5.4995	5.4870
MP2-B	80	20	5.4745	
MP3-A	70	30	5.6338	5.6207
MP3-B	70	30	5.6076	

Continuación Tabla 28.

Muestra	% Palmiste	% Raquis	% Humedad	% Humedad Promedio, Base Húmeda
MP4-A	60	40	5.6820	5.7071
MP4-B	60	40	5.7321	
MPR-A	50	50	5.8186	5.7990
MPR-B	50	50	5.7794	
MR1-A	40	60	5.9065	5.9171
MR1-B	40	60	5.9278	
MR2-A	30	70	6.0182	6.0328
MR2-B	30	70	6.0475	
MR3-A	20	80	6.1669	6.1442
MR3-B	20	80	6.1214	
MR4-A	10	90	6.2032	6.2613
MR4-B	10	90	6.3194	

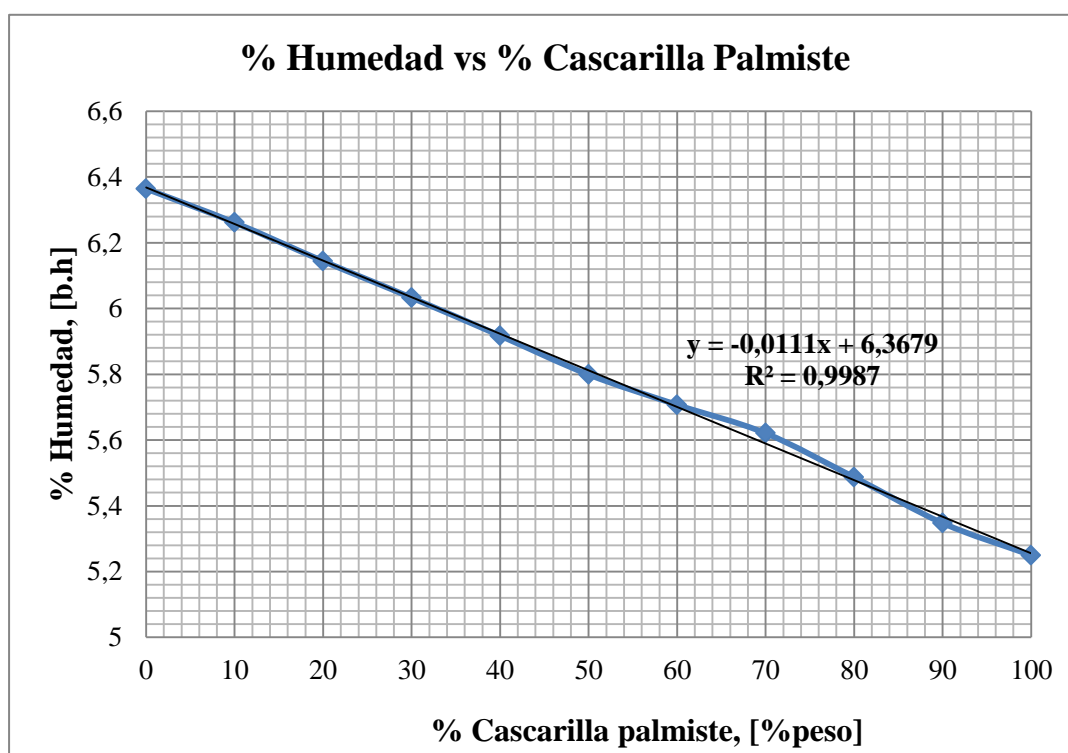


Gráfico 2. Relación porcentaje de humedad y porcentaje de cascarilla de palmiste en las mezclas.

De la regresión establecida en este gráfico se obtuvo la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9987$  que nos indica que los datos se ajustan perfectamente al modelo. Éste relaciona el porcentaje de humedad con el porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste usada.

## 5.2. Cálculo de la composición elemental promedio de la cascarilla de palmiste, raquis de palma, y mezclas.

Se determinó los porcentajes promedio de la composición elemental tanto de la cascarilla de nuez de palmiste, del raquis de palma y de las mezclas preparadas de ambos componentes. Estos valores se indican en la siguiente tabla.

Cálculo modelo de la composición promedio de carbono para la muestra MPA

$$\%C_p = \frac{\%C_1 + \%C_2}{2} \quad (12)$$

Donde:

$\%C$  = Porcentaje promedio de carbono en la muestra

$\%C_1$  = Porcentaje de carbono medición uno

$\%C_2$  = Porcentaje de carbono medición dos

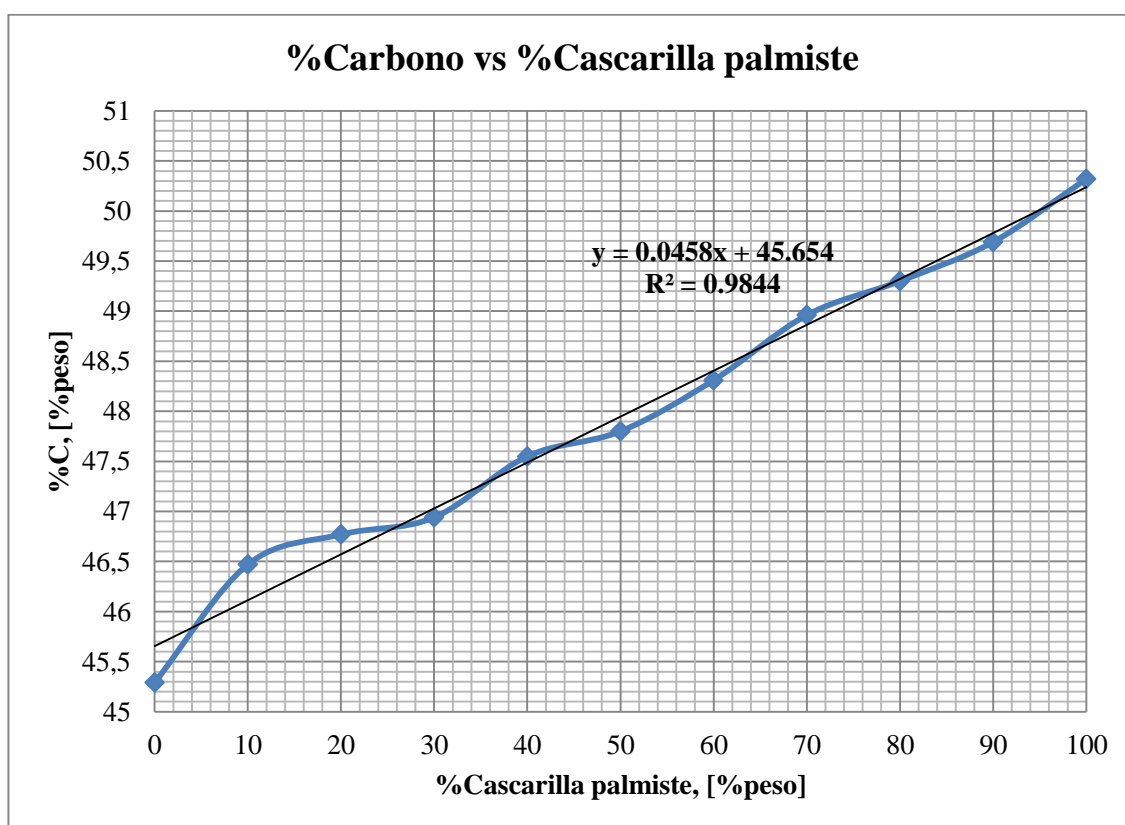
De igual forma se procede tanto para H, N, S y O.

**Tabla 29. Composición elemental promedio de las muestras analizadas**

Muestra	% Palmiste	% Raquis	% C <sub>p</sub>	%H <sub>p</sub>	%N <sub>p</sub>	%S <sub>p</sub>	%O <sub>p</sub>
MP	100	0	50.32	6.195	0.795	0.325	42.37
MP1	90	10	49.69	6.185	0.835	0.35	42.94
MP2	80	20	49.3	6.145	0.9	0.355	43.30
MP3	70	30	48.96	6.095	1.015	0.36	43.57
MP4	60	40	48.31	6.025	1.055	0.36	44.25
MPR	50	50	47.8	5.97	1.075	0.37	44.79

Continuación Tabla 29.

Muestra	% Palmiste	% Raquis	% C <sub>p</sub>	%H <sub>p</sub>	%N <sub>p</sub>	%S <sub>p</sub>	%O <sub>p</sub>
MR1	40	60	47.55	5.92	1.17	0.38	44.98
MR2	30	70	46.94	5.89	1.225	0.385	45.56
MR3	20	80	46.77	5.87	1.27	0.4	45.69
MR4	10	90	46.47	5.825	1.42	0.465	45.82
MR	0	100	45.29	5.73	1.57	0.508	46.90

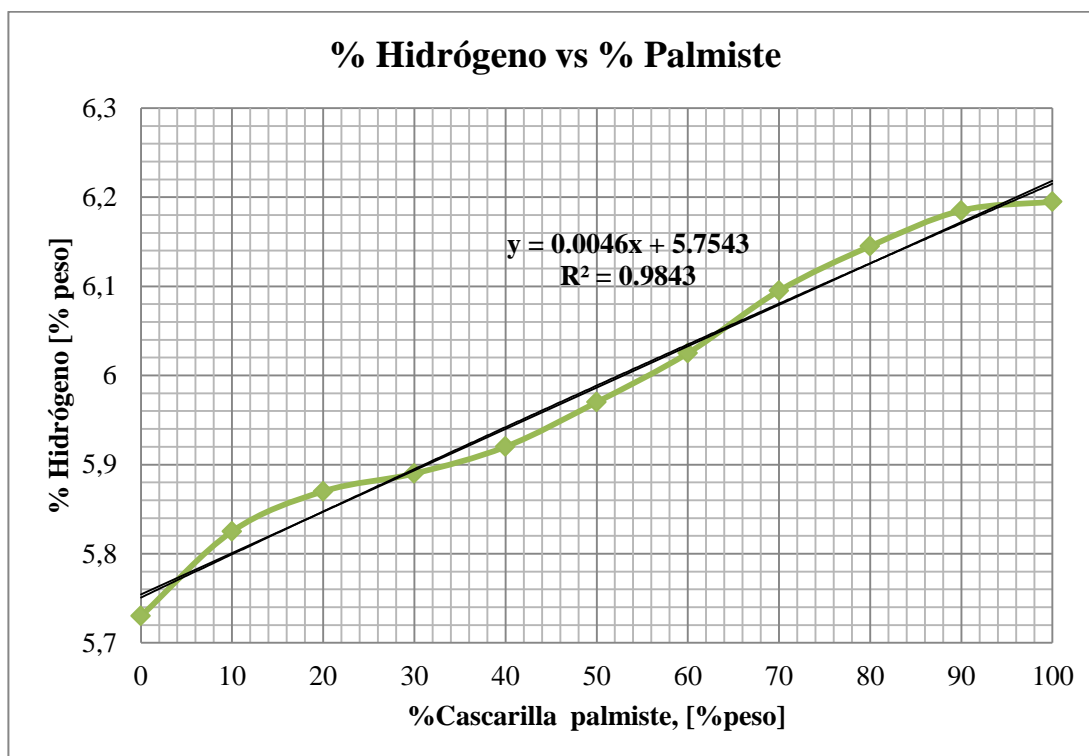


**Gráfico 3. Porcentaje de carbono en función del porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión establecida en este gráfico, se obtiene la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,9844$ , lo que indica que los datos se ajustan perfectamente al modelo lineal.

Éste modelo relaciona el porcentaje de carbono en función del porcentaje de cascarilla de palmiste utilizada, la diferencia entre el 100% y estos porcentajes de cascarilla corresponden al porcentaje de raquis en las mezclas

$$\%C = 0,0458 * \% Palmiste + 45,64 \quad (13)$$

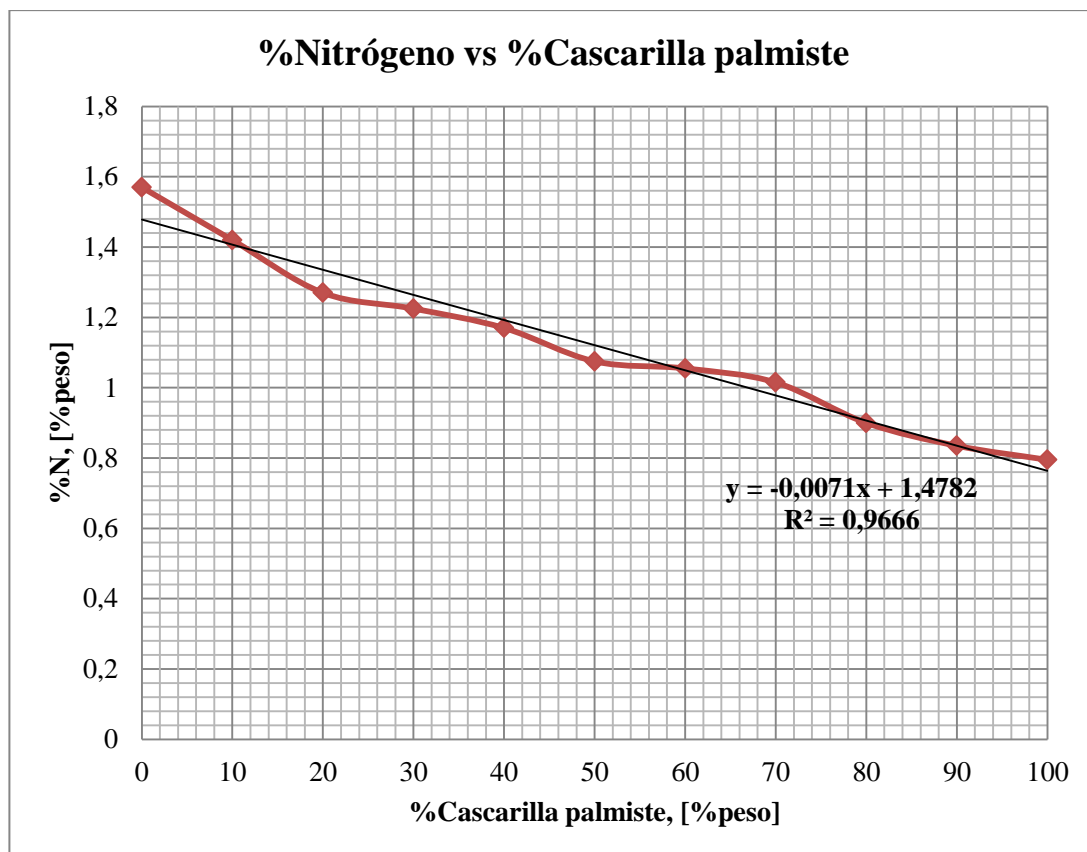


**Gráfico 4. Porcentaje de hidrógeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión establecida en el gráfico se obtuvo la ecuación de una recta y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9843$  que indica que los datos se ajustan al modelo establecido. Éste modelo relaciona el porcentaje de hidrógeno y el porcentaje de cascarilla de palmiste en las muestras en función del porcentaje de cascarilla de palmiste utilizada, la diferencia entre 100% y estos porcentajes de cascarilla corresponden al porcentaje de raquis en las mezclas.

$$\% H = 0,0046 * \% Palmiste + 5,7543 \quad (14)$$

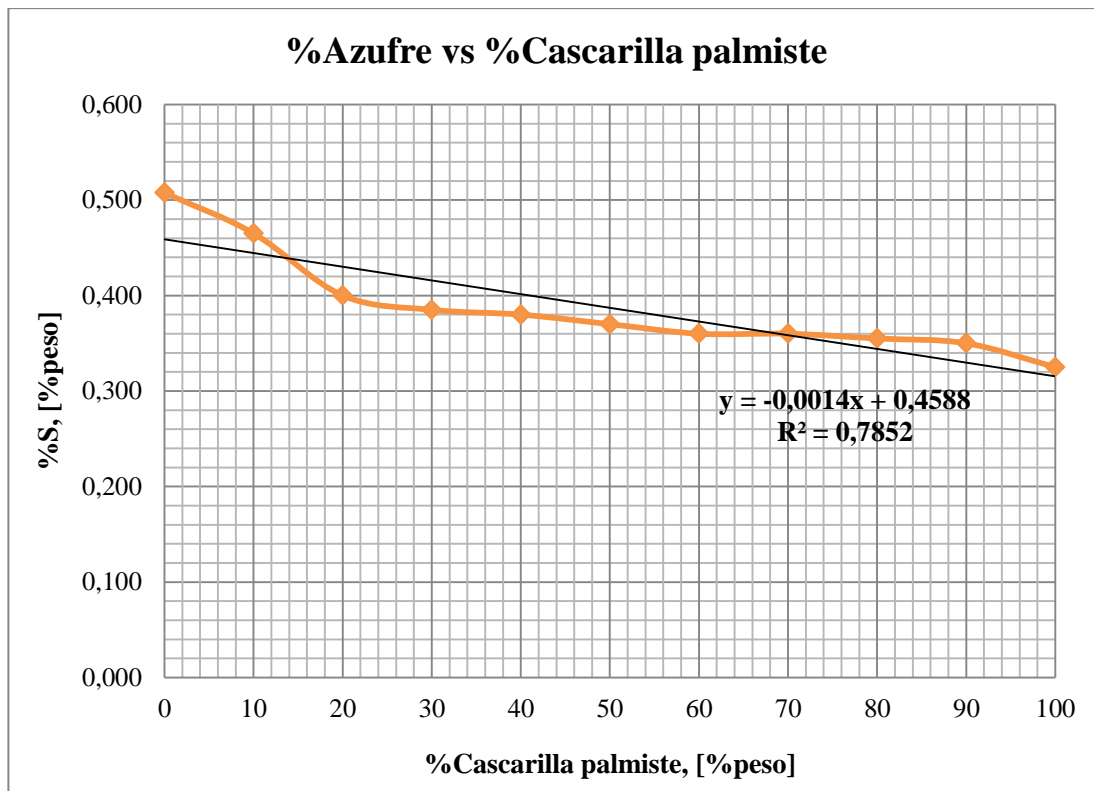




**Gráfico 5. Porcentaje de nitrógeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión realizada se obtiene en este gráfico la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9666$  que indica que los datos se ajustan perfectamente al modelo escogido de regresión. Ésta relación manifiesta el porcentaje de nitrógeno en las muestras en función del porcentaje de cascarilla de palmiste utilizada, la diferencia entre 100% y estos porcentajes de cascarilla corresponden al porcentaje de raquis en las mezclas.

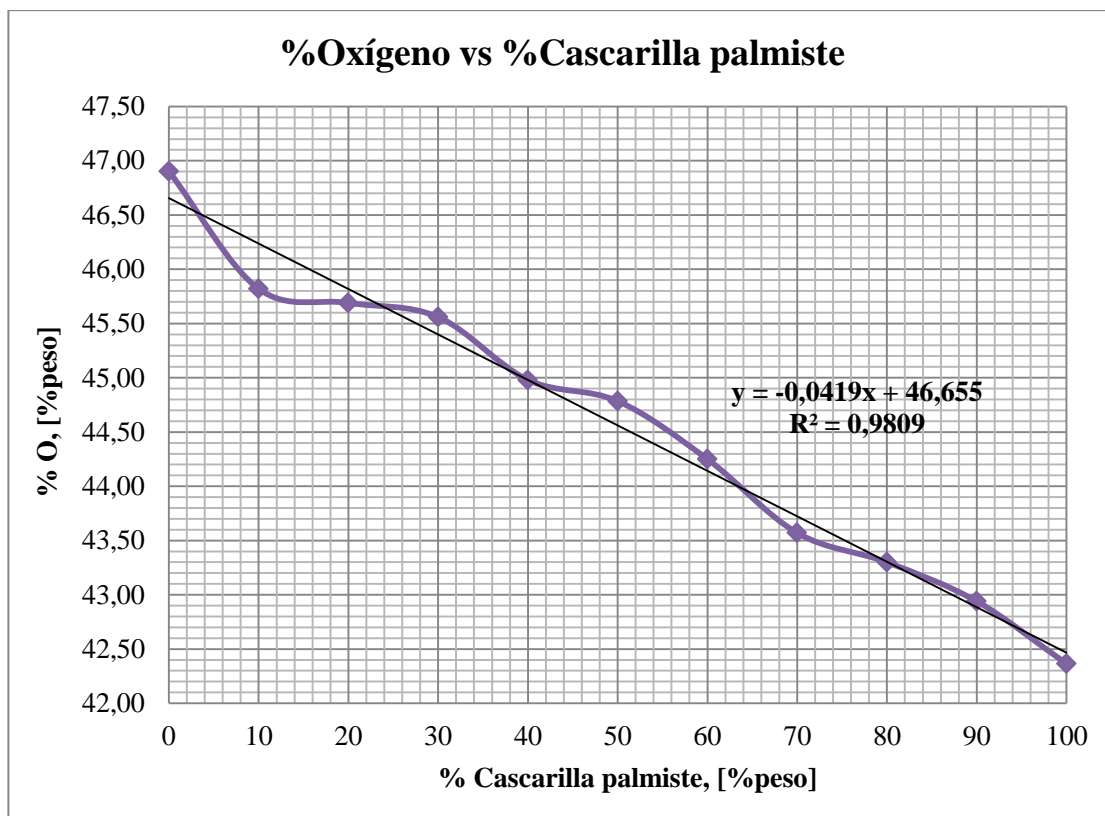
$$\% N = -0,0071 * \% Palmiste + 1,4782 \quad (15)$$



**Gráfico 6. Porcentaje de azufre en función del porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión realizada se obtiene en este gráfico la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,7852$  que indica que los datos presentan cierta desviación al modelo escogido de regresión. Este hecho se explicará más adelante en la discusión. Ésta relación manifiesta el porcentaje de azufre en las muestras en función del porcentaje de cascarilla de palmiste utilizada, la diferencia entre 100% y estos porcentajes de cascarilla corresponden al porcentaje de raquis en las mezclas.

$$\% S = -0,0014 * \% Palmiste + 0,4588 \quad (16)$$



**Gráfico 7. Porcentaje de oxígeno en función del porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión realizada se obtiene en este gráfico la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9809$  que indica que los datos se ajustan al modelo escogido de regresión.. Ésta relación manifiesta el porcentaje de oxígeno en las muestras en función del porcentaje de cascarilla de palmiste utilizada, la diferencia entre 100% y estos porcentajes de cascarilla corresponden al porcentaje de raquis en las mezclas.

$$\% O = -0,0419 * \% Palmiste + 46,655 \quad (17)$$

**Tabla 30. Resumen de las propiedades químicas de cascarilla, raquis, y mezclas.**

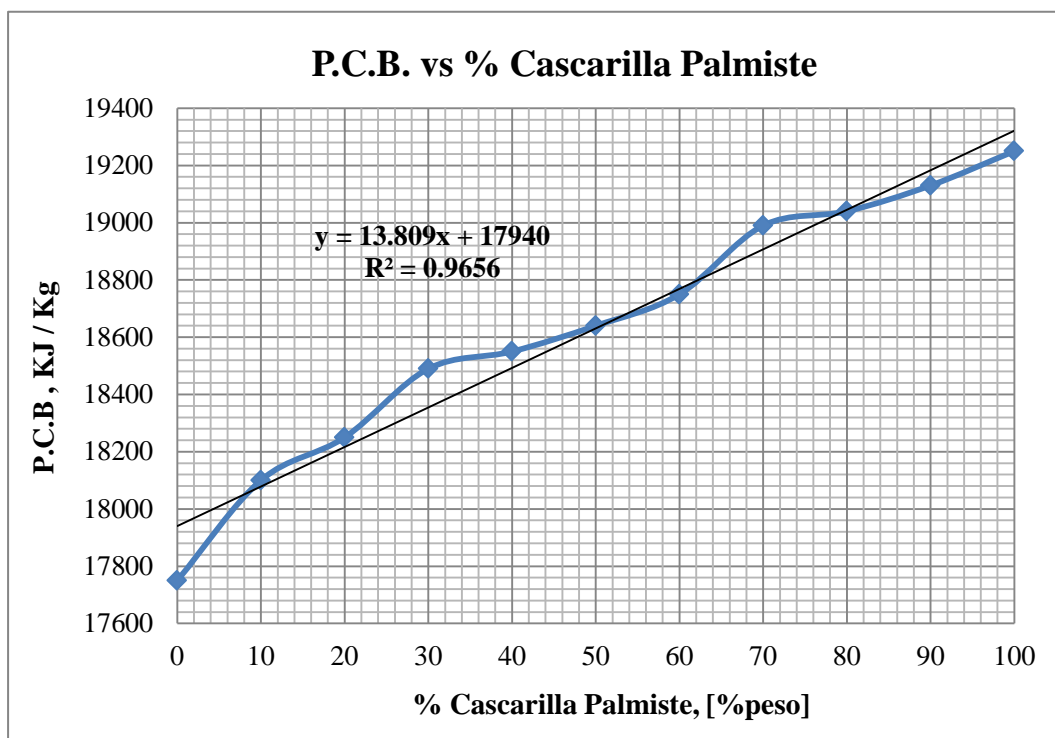
<b>Muestra</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>%Cenizas</b>	<b>%Humedad</b>	<b>% C</b>	<b>% H</b>	<b>%N</b>	<b>%S</b>	<b>%O</b>	<b>P.C.B, KJ/kg</b>
MP	100	0	3.1844	5.2495	50.320	6.195	0.795	0.33	42.370	19250
MP1	90	10	3.2591	5.3475	49.690	6.185	0.835	0.355	42.940	19130
MP2	80	20	3.3383	5.4870	49.300	6.145	0.900	0.355	43.300	19040
MP3	70	30	3.4481	5.6207	48.960	6.095	1.015	0.360	43.570	18990
MP4	60	40	3.5426	5.7071	48.310	6.025	1.055	0.360	44.250	18750
MPR	50	50	3.6001	5.7990	47.80	5.970	1.075	0.370	44.790	18640
MR1	40	60	3.6805	5.9171	47.550	5.920	1.170	0.380	44.980	18550
MR2	30	70	3.7660	6.0328	46.940	5.890	1.225	0.385	45.560	18490
MR3	20	80	3.8590	6.1442	46.770	5.870	1.270	0.400	45.690	18250
MR4	10	90	3.9451	6.2613	46.470	5.825	1.420	0.465	45.820	18100
MR	0	100	4.0516	6.364	45.290	5.730	1.570	0.508	46.900	17750

### 5.3. Relación entre poder calorífico y variables analizadas.

#### 5.3.1. Relación entre poder calorífico y porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste.

**Tabla 31. Poder Calorífico en función del porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste**

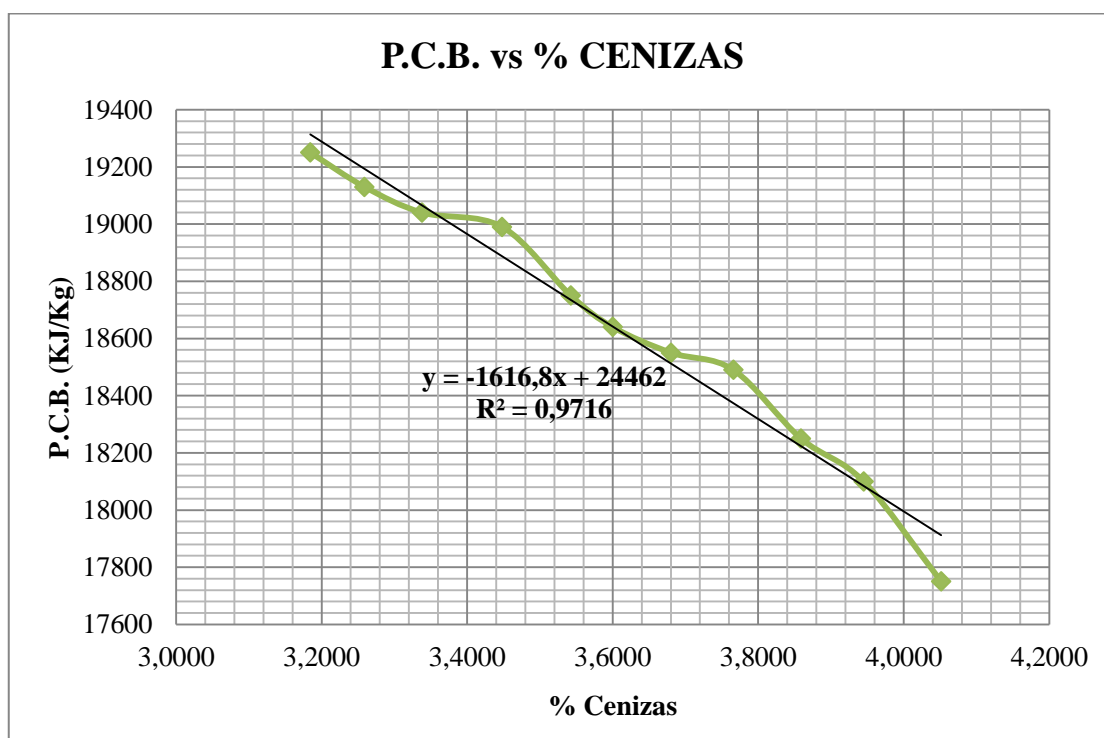
Muestra	% Palmiste	% Raquis	Poder Calorífico Bruto, kJ/kg
MP	100	0	19250
MP1	90	10	19130
MP2	80	20	19040
MP3	70	30	18990
MP4	60	40	18750
MPR	50	50	18640
MR1	40	60	18550
MR2	30	70	18490
MR3	20	80	18250
MR4	10	90	18100
MR	0	100	17750



**Gráfico 8. Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de cascarilla de palmiste**

De la regresión establecida en éste gráfico, el modelo matemático de una recta se ajusta con bastante exactitud a los datos, esto lo indica el coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9656$ .

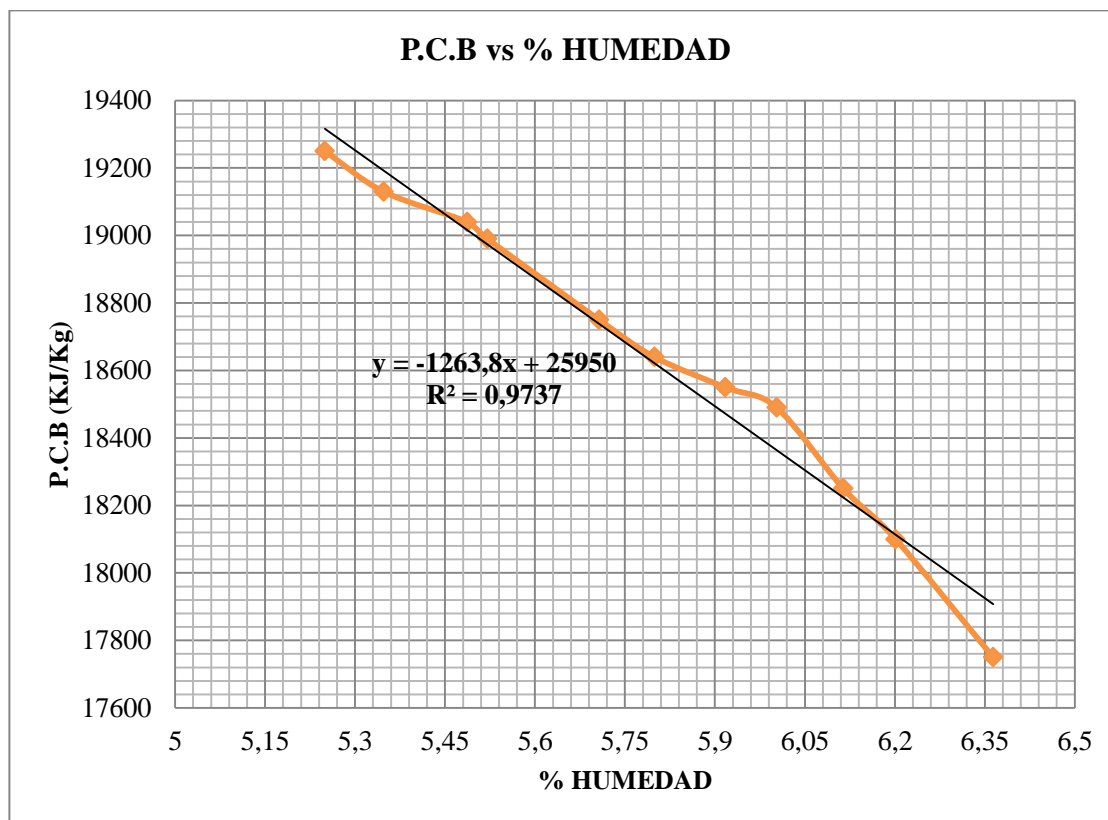
### 5.3.2. Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de cenizas.



**Gráfico 9. Relación entre poder calorífico y porcentaje de cenizas**

De la regresión realizada se obtuvo la ecuación de una recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9716$  que indica que los datos se ajustan perfectamente al modelo establecido. Cabe recalcar que el porcentaje de cenizas esta en el rango correspondiente a la disminución o aumento del porcentaje de cascarilla de nuez y raquis respectivamente, es decir, el valor menor del porcentaje de cenizas corresponde a una concentración de 100 % de cascarilla de nuez, y el valor mayor corresponde a una concentración del 100% de raquis de palma africana.

### 5.3.3. Relación entre poder calorífico bruto y porcentaje de humedad.

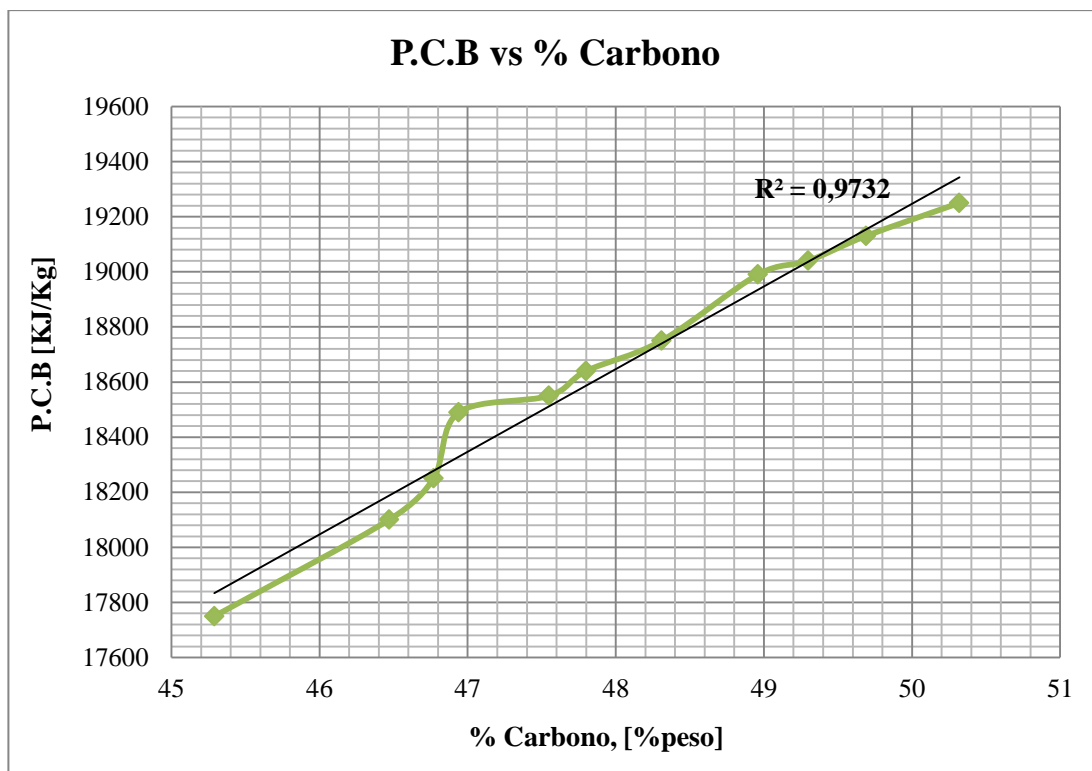


**Gráfico 10. Relación entre poder calorífico y porcentaje de humedad**

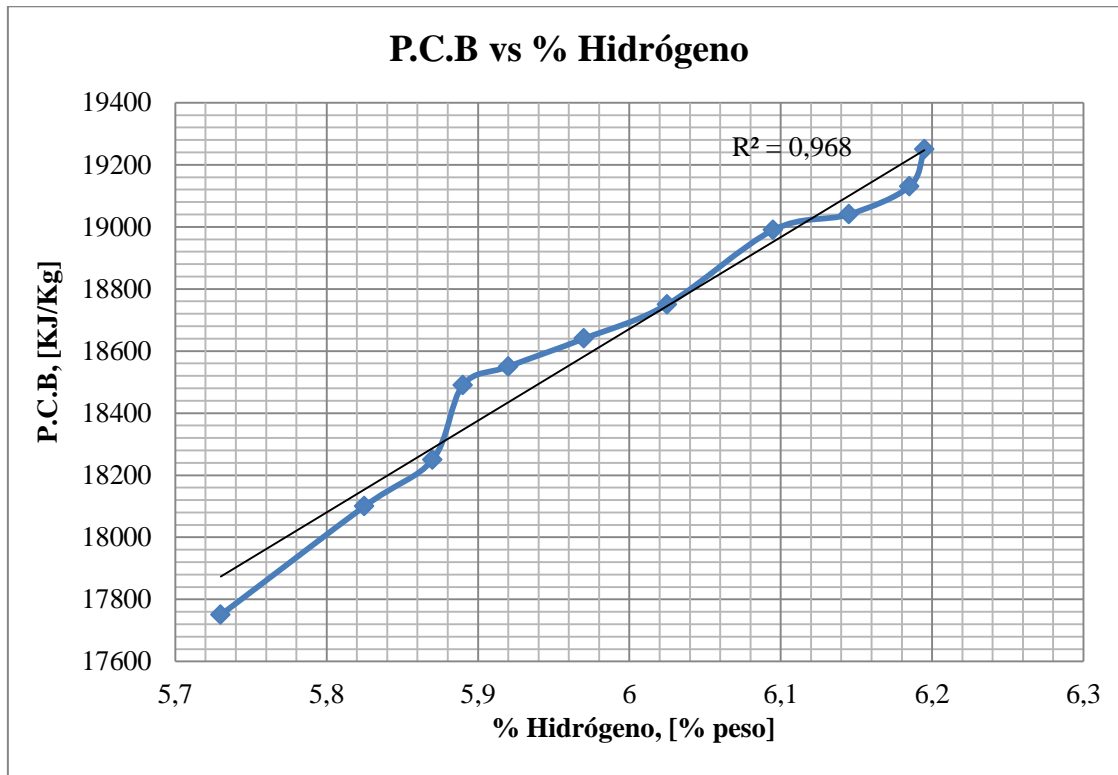
De la regresión establecida en el gráfico se obtuvo la ecuación de una línea recta con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9737$  que indica que los datos se ajustan al modelo. Los valores en el eje de las abscisas corresponden a los porcentajes de humedad tanto de la cascarilla de nuez de palmiste, raquis de palma y de las mezclas de ambos componentes. El valor menor de humedad corresponde a una concentración de 100% de cascarilla de palmiste. El incremento de los valores de humedad se debe a una disminución en la concentración de la cascarilla en las mezclas hasta llegar a obtener el mayor valor de humedad que corresponde a una concentración de 100% raquis de palma africana.

### 5.3.4. Relación entre poder calorífico y composición elemental.

Estas relaciones se realizaron para comprobar si las variables de composición elemental presentan efectivamente una relación lineal con la variable dependiente (poder calorífico) y se puede realizar la regresión lineal múltiple.

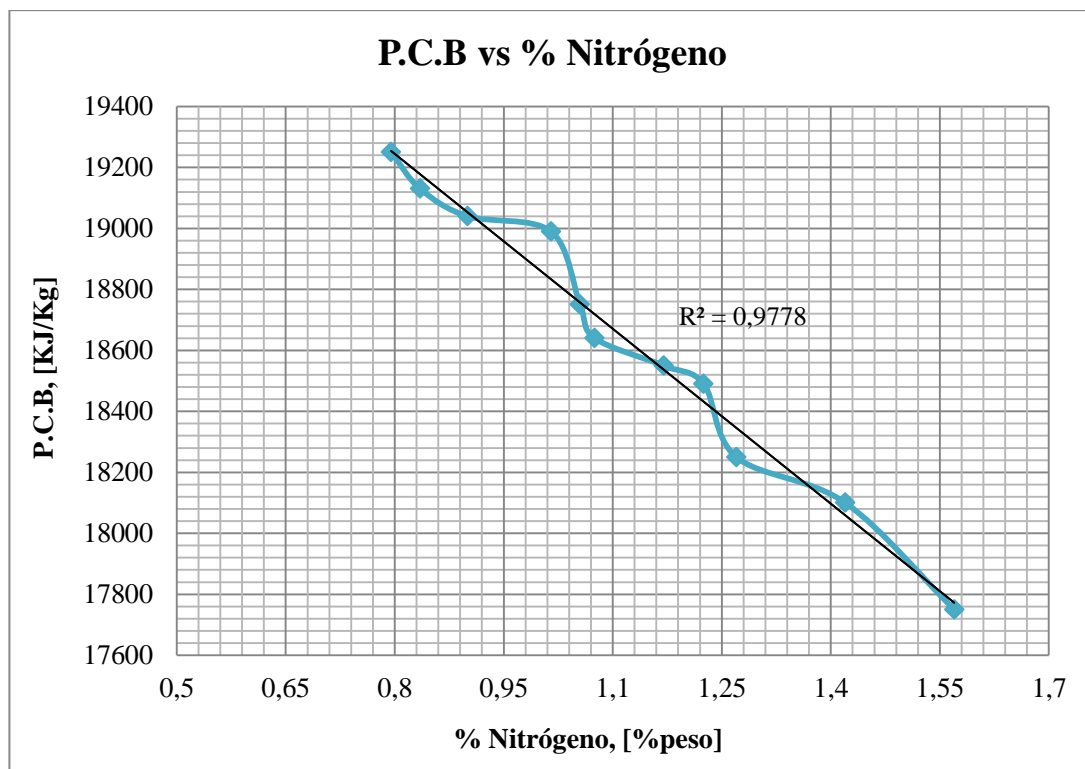


**Gráfico 11. Poder calorífico en función del porcentaje de carbono elemental**

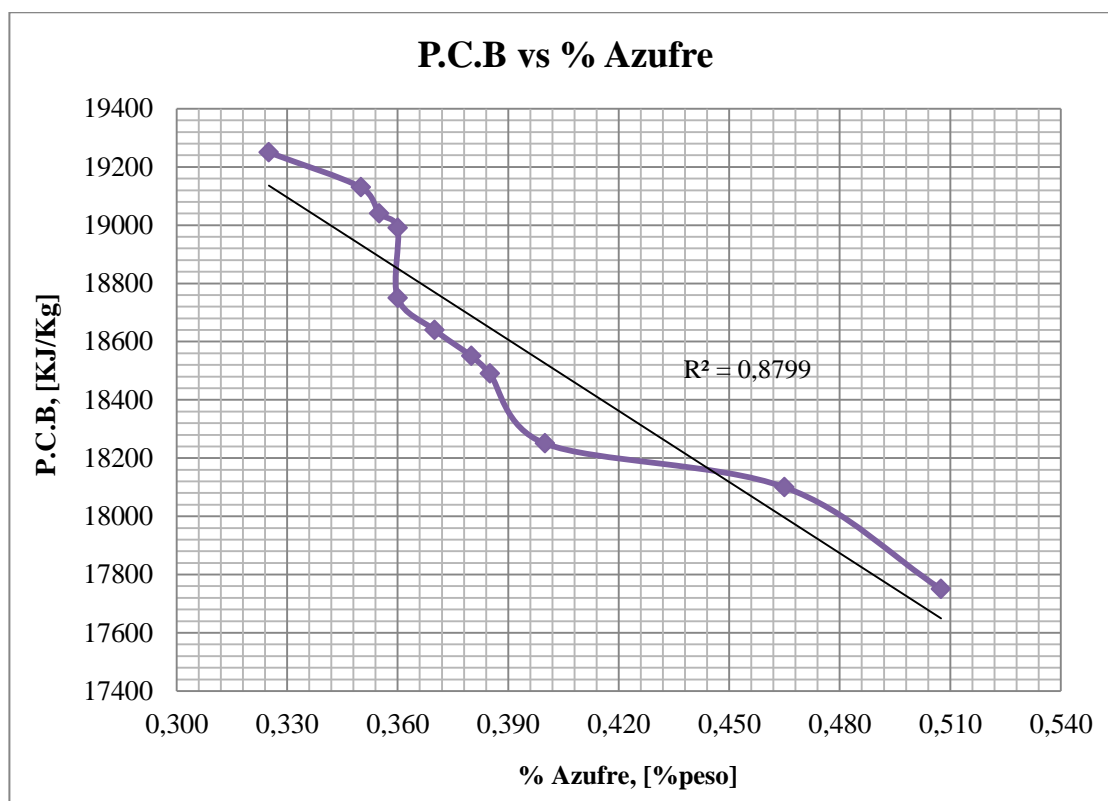


**Gráfico 12. Poder calorífico en función del porcentaje de hidrógeno elemental**





**Gráfico 13. Poder calorífico en función del porcentaje de nitrógeno elemental**



**Gráfico 14. Poder calorífico en función del porcentaje de azufre elemental.**

## 5.4. Relación múltiple entre poder calorífico y variables de análisis elemental y proximal

**5.4.1. Regresión lineal múltiple entre poder calorífico y variables analizadas.** Se realizó la regresión lineal múltiple entre poder calorífico y las variables del análisis elemental y proximal haciendo uso del software SPSS 19 (Statistical Product and Service Solutions) que es un software estadístico que nos permite establecer las relaciones existentes entre una variable dependiente y varias variables explicativas. Para realizar la regresión lineal multivariable, se debe partir de los siguientes criterios que deben existir en las variables explicativas a ser tratadas:

- Los valores de la variable dependiente han sido generados por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas y un término aleatorio.
- Deben tener sentido numérico.
- Las variables explicativas no deben ser redundantes, es decir no se debe considerar como variable explicativa para el modelo a alguna variable que tenga relación lineal con otra, o que resulte de una combinación de las demás.
- Las variables introducidas en el modelo deben tener una cierta justificación teórica.
- La relación individual entre la variable dependiente y las variables explicativas debe ser lineal, es decir, proporcional <sup>[33]</sup>.

Una vez que se ha establecido que las variables analizadas cumplen con los criterios, se puede proceder a realizar la regresión lineal. Finalmente para establecer si el modelo predicho o determinado es válido, se hizo uso de algunos criterios estadísticos que más adelante serán explicados.

$$P.C.B = f (\% C, \% H, \% N, \% S, \% O, \% Humedad, \% Cenizas)$$

La ecuación final que se obtendrá responde al siguiente modelo matemático

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots \dots \dots b_nX_n \quad (18)$$

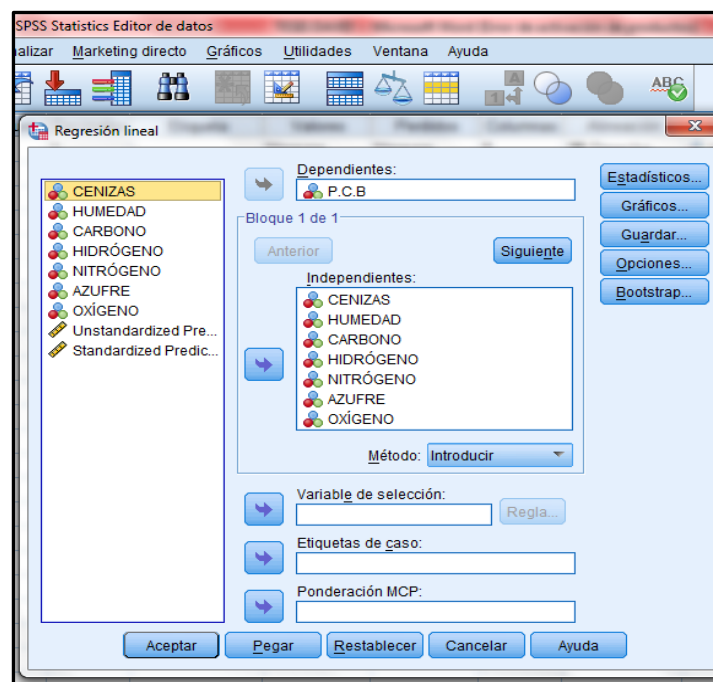
**Tabla 32. Datos de variables explicativas y variable dependiente**

Identificación de Muestras			Variables Explicativas							Variable Dependiente
Muestra	% Palmiste	% Raquis	%Cenizas	%Humedad	% C	% H	%N	%S	%O	P.C.B, kJ/kg
MP	100	0	3.1844	5.2495	50.320	6.195	0.795	0.33	42.370	19250
MP1	90	10	3.2591	5.3475	49.690	6.185	0.835	0.355	42.940	19130
MP2	80	20	3.3383	5.4870	49.300	6.145	0.900	0.355	43.300	19040
MP3	70	30	3.4481	5.6207	48.960	6.095	1.015	0.360	43.570	18990
MP4	60	40	3.5426	5.7071	48.310	6.025	1.055	0.360	44.250	18750
MPR	50	50	3.6001	5.7990	47.80	5.970	1.075	0.370	44.790	18640
MR1	40	60	3.6805	5.9171	47.550	5.920	1.170	0.380	44.980	18550
MR2	30	70	3.7660	6.0328	46.940	5.890	1.225	0.385	45.560	18490
MR3	20	80	3.8590	6.1442	46.770	5.870	1.270	0.400	45.690	18250
MR4	10	90	3.9451	6.2613	46.470	5.825	1.420	0.465	45.820	18100
MR	0	100	4.0516	6.364	45.290	5.730	1.570	0.508	46.900	17750

Los resultados a continuación presentados son los obtenidos con el software SPSS 19. Se muestran las correlaciones que nos permiten validar el modelo obtenido, aquellas que nos indican la linealidad entre las variables explicativas y la variable independiente, además del ajuste de las variables al modelo matemático generado. También se incluye resultados de varianza y del coeficiente de correlación  $R^2$  en conjunto con el modelo matemático final de poder calorífico en función de las variables explicativas mencionadas en la tabla 32.

	CENIZAS	HUMEDAD	CARBONO	HIDRÓGENO	NITRÓGENO	AZUFRE	OXÍGENO	P.C.B
1	4,05	6,36	45,29	5,73	1,57	,51	46,90	17750,00
2	3,95	6,26	46,47	5,83	1,42	,47	45,82	18100,00
3	3,86	6,14	46,77	5,87	1,27	,40	45,69	18250,00
4	3,77	6,03	46,94	5,89	1,23	,39	45,56	18490,00
5	3,68	5,92	47,55	5,92	1,17	,38	44,98	18550,00
6	3,60	5,80	47,80	5,97	1,08	,37	44,79	18640,00
7	3,54	5,71	48,31	6,03	1,06	,36	44,25	18750,00
8	3,45	5,62	48,96	6,10	1,02	,36	43,57	18990,00
9	3,34	5,49	49,30	6,15	,90	,36	43,30	19040,00
10	3,26	5,35	49,69	6,19	,84	,35	42,94	19130,00
11	3,18	5,25	50,32	6,20	,80	,33	42,37	19250,00

**Figura 18. Datos variables explicativas e independiente en el software SPSS 19**



**Figura 19. Ingreso de variables dependiente y explicativas para la regresión**

**Tabla 33. Valores de la media y desviación típica de variables explicativas y dependiente**

Estadísticos descriptivos			
Variables	Media	Desviación típica	N
P.C.B	18630,9091	466,07842	11
CENIZAS	3,6068	0,28415	11
HUMEDAD	5,8118	0,36909	11
CARBONO	47,9455	1,53224	11
HIDRÓGENO	5,9864	0,15515	11
NITRÓGENO	1,1209	0,24105	11
AZUFRE	0,3871	0,05379	11
OXÍGENO	44,5609	1,40192	11

**Tabla 34. Correlación de Pearson entre variables explicativas y dependiente**

Correlaciones									
VARIABLES		P.C.B	CENIZAS	HUMEDAD	CARBONO	HIDRÓGENO	NITRÓGENO	AZUFRE	OXÍGENO
<b>Correlación de Pearson</b>	P.C.B	1,000	-0,986	-0,980	0,987	0,984	-0,989	-0,938	0,930
	Cenizas	-0,986	1,000	0,999	-0,993	-0,993	0,988	0,893	0,990
	Humedad	-0,980	0,999	1,000	-0,990	-0,990	0,984	0,885	0,988
	Carbono	0,987	-0,993	-0,990	1,000	0,994	-0,983	-0,894	-0,999
	Hidrógeno	0,984	-0,993	-0,990	0,994	1,000	-0,982	-0,881	-0,993
	Nitrógeno	-0,989	0,988	0,984	-0,983	-0,982	1,000	0,944	0,974
	Azufre	-0,938	0,893	0,885	-0,894	-0,881	0,944	1,000	0,873
	Oxígeno	0,930	0,990	0,988	-0,999	-0,993	0,974	0,873	1,000

**Tabla 35. Coeficiente de correlación  $R^2$  para el modelo de regresión lineal múltiple**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	,998 <sup>a</sup>	,997	,992	40,83238	,997	216,482	6	4	,000
a. Variables predictoras: (Constante), HUMEDAD, AZUFRE, HIDRÓGENO, CARBONO, NITRÓGENO, CENIZAS									
b. Variable dependiente: P.C.B									

**Tabla 36. Coeficientes del modelo de regresión múltiple**

Variables	Coeficientes no estandarizados			Intervalo de confianza de 95.0% para B		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad
	B	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia
(Constante)	14324,559	2,367	,077	-2475,532	31124,650				
CENIZAS	-3700,830	-2,415	,073	-7955,794	554,135	-0,986	-0,770	-0,067	0,010
CARBONO	4,499	,049	,963	-249,634	258,631	0,987	0,025	0,001	0,048
HIDRÓGENO	1190,734	1,213	,292	-1535,028	3916,496	0,984	0,519	0,034	0,007
NITRÓGENO	1321,574	1,703	,164	-832,575	3475,724	-0,989	0,648	0,047	0,050
AZUFRE	-3938,846	-3,102	,036	-7464,486	-413,206	-0,938	-0,840	-0,086	0,036
HUMEDAD	1781,530	1,919	,127	-795,936	4358,995	-0,980	0,692	0,053	0,010

El superíndice *a* en la tabla 35 corresponde a las variables predictoras en el modelo, es decir aquellas que entran dentro del nivel de significancia establecido por el software que es de 0,05 % y que son válidas o influyen al modelo de forma directa, es decir, se tiene un nivel de confianza del 95% de aceptación de la hipótesis.

La variable explicativa correspondiente al porcentaje de oxígeno ha sido eliminada del modelo matemático por parte del software, este hecho se explicará en la discusión de los resultados obtenidos.

**Tabla 37. Variable eliminada por el software**

Modelo	Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticos de colinealidad		
					Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima
Oxígeno	12,981	0,345	0,753	0,195	6,944E-7	1440133,84	6,944E-7

**5.4.2. Ecuación del modelo de regresión lineal.** La ecuación que a continuación se presenta es producto del proceso de la regresión lineal múltiple realizada en el literal anterior. Las unidades entregadas por esta ecuación para el poder calorífico son KJ/Kg.

$$\begin{aligned}
 P.C.B = & 14324,55 + 4,50 * \%C + 1190,73 * \%H + 1321,57 * \%N - 3938,84 * \%S \\
 & + 1781,55 * \%Hum - 3700,8 * \%Cn
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Donde:

P.C.B = Poder calorífico bruto, [KJ/Kg]

%C = Porcentaje de carbono elemental, [%peso]

%H = Porcentaje de hidrógeno elemental, [%peso]

%N = Porcentaje de nitrógeno elemental, [%peso]

%S = Porcentaje de azufre elemental, [%peso]

%Hum = Porcentaje de humedad.

%Cn = Porcentaje de cenizas

### 5.5. Cálculo del poder calorífico con el modelo de regresión lineal múltiple.

Se realizó el cálculo del poder calorífico haciendo uso de la ecuación obtenida mediante la regresión lineal múltiple (19) y se comparó los valores calculados con los valores obtenidos de forma experimental obteniendo el porcentaje de error.

Cálculo modelo para la cascarilla de nuez de palmiste haciendo uso de la ecuación 19 y los datos de la tabla 30:

$$P.C.B = 14324,55 + (4,50 * 50,32) + (1190,73 * 6,195) + (1321,57 * 0,795) - (3938,84 * 0,325) + (1781,55 * 5,250) - (3700,8 * 3,184)$$

$$P.C.B = 19265,32 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$\% \text{ error} = \frac{P.C.B_{calculado} - P.C.B_{medido}}{P.C.B_{medido}} * 100 \quad (20)$$

$$\% \text{ error} = \frac{19265,32 - 19250}{19250} * 100$$

$$\% \text{ error} = 0,08 \%$$

Los resultados del poder calorífico para el raquis y las mezclas entre cascarilla de nuez y raquis en diferentes proporciones se presenta a continuación en la tabla 38, en conjunto con el porcentaje de error entre ambos valores:



**Tabla 38. Comparación entre poder calorífico calculado y medido**

<b>Identificación</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>P.C.B medido, KJ/Kg</b>	<b>P.C.B calculado, KJ/Kg</b>	<b>% error</b>
MR	0	100	17750	17770.37	0.11
MR-4	10	90	18100	18069.34	-0.17
MR-3	20	80	18250	18292.09	0.23
MR-2	30	70	18490	18461.89	-0.15
MR-1	40	60	18550	18557.68	0.04
MPR	50	50	18640	18619.14	-0.11
MP-1	60	40	18750	18749.10	0.00
MP-2	70	30	18990	18978.34	-0.06
MP-3	80	20	19040	19075.35	0.19
MP-4	90	10	19130	19103.08	-0.14
MP	100	0	19250	19265.32	0.08

#### **5.6. Comparación entre el poder calorífico con la relación de Gaur-Reed y el poder calorífico experimental medido.**

Se realizó el cálculo del poder calorífico con la relación de Gaud-Reed manifestada en la ecuación (8), y se comparó con los valores de poder calorífico obtenidos mediante la experimentación.

Cálculo modelo para la cascarilla de nuez de palmiste haciendo uso de la ecuación de Gaud-Reed:

$$Q_{h,o} = [ 0,3491 * 50,32 + 1,1783 * 6,195 + 0,1005 * 0,325 - 0,1034 * 42,365 - (0,0151 * 0,795) - (0,0211 * 3,184) ] * 1000$$

$$Q_{h,o} = 20439,21 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$\% \text{ error} = \frac{20439,21 - 19250}{19250} * 100$$

$$\% \text{ error} = 6,18 \%$$

Los resultados del poder calorífico con la relación de Gaur-Reed para el raquis y las mezclas, y los porcentajes de error se presentan a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 39. Comparación poder calorífico entre Gaur-Reed y**

<b>Identificación</b>	<b>% Palmiste</b>	<b>% Raquis</b>	<b>P.C.B<sub>Gaur-Reed</sub>, KJ/kg</b>	<b>P.C.B<sub>medido</sub>, KJ/kg</b>	<b>% error</b>
MR	0	100	17654.49	17750	-0.54
MR-4	10	90	18290.54	18100	1.05
MR-3	20	80	18459.28	18250	1.15
MR-2	30	70	18556.77	18490	0.36
MR-1	40	60	18867.17	18550	1.71
MPR	50	50	19035.65	18640	2.12
MP-1	60	40	19334.33	18750	3.12
MP-2	70	30	19716.63	18990	3.83
MP-3	80	20	19925.71	19040	4.65
MP-4	90	10	20148.37	19130	5.32
MP	100	0	20439.21	19250	6.18

#### **5.7. Cálculo de la cantidad de cascarilla de nuez de palmiste y de raquis de palma africana generada en la producción de la empresa AEXAV.**

Para realizar este cálculo se partió de los datos de producción tanto de cascarilla de nuez de palmiste como de raquis proporcionados por la empresa AEXAV. Estos datos se indican a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 40. Producción anual de residuos biomásicos de la empresa AEXAV.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Superficie de producción fruta de palma	ha	5000
Cantidad de fruta generada	Tm/año * ha	16
Porcentaje de raquis presente en la cantidad despachada (fruta de palma)	%	22

**Continuación Tabla 40**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Cantidad de nuez de palmiste procesada	Tm/día	55
Porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste presente en la cantidad de nuez procesada	%	60

A continuación se presenta el cálculo de la cantidad de raquis disponible en kg/día.

$$P_{RG} = S_P * PF_{procesado} * \%R_{PF} * 2,739 \quad (21)$$

Donde:

$S_P$  = Superficie de producción, [Ha].

$P_{RG}$  = Cantidad de raquis generada, [Kg/día].

$PF_{procesado}$  = Cantidad de fruta de palma procesada, [Ton/año ha].

$\%R_{PF}$  = Porcentaje de raquis por tonelada de fruta procesada.

El factor 2.739 es el valor que permite el cambio de unidades para obtener la cantidad de raquis en kg/día

$$P_{RG} = 5000 * 16 * 0.22 * 1000$$

$$P_{RG} = 48219,18 \text{ kg raquis/día}$$

Para el cálculo de la cantidad de cascarilla generada en el procesamiento de nuez de palma africana se usó la siguiente ecuación:

$$P_{CG} = PN_{procesado} * \%C_{PNP} * 1000 \quad (22)$$

Donde:

$P_{CG}$  = Cantidad de cascarilla generada, [Kg/día]

$PN_{procesado}$  = Cantidad de nuez de palmiste procesada, [Ton/día]

$\%C_{PNP}$  = Porcentaje de cascarilla por tonelada de nuez procesada.

$$P_{CG} = 55 * 0,6 * 1000$$

$$P_{CG} = 33000 \text{ kg cascarilla /día}$$

### **5.8. Cálculo de las propiedades químicas de la mezcla entre la cantidad recursos biomásicos disponibles en la empresa AEXAV.**

Para determinar las propiedades químicas, se consideró que se va a utilizar todo el recurso biomásico disponible, es decir, la cantidad de cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana disponibles que se calcularon en el numeral anterior, conformarán una mezcla fija cascarilla de nuez – raquis.

De esta forma, se obtiene una mezcla con un porcentaje de cascarilla y un porcentaje de raquis definidos instantáneamente, con lo cual, mediante las regresiones anteriormente establecidas de las propiedades químicas en función del porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste, podemos calcular haciendo uso de la ecuación obtenida mediante el proceso de regresión lineal múltiple el poder calorífico entregado por esta mezcla, para finalmente determinar la cantidad de energía en megavatios (MW) que se puede obtener al realizar un proceso de combustión directa de estos recursos biomásicos combinados en una sola mezcla usada como combustible

#### **5.8.1. Cálculo del porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste presente en la mezcla.**

$$MB_{RD} = P_{RG} + P_{CG} \tag{23}$$

Donde:

$MB_{RD}$  = Mezcla biomásica de recursos disponibles, [Kg/día]

$P_{RG}$  = Cantidad de raquis generada, [Kg/día].

$P_{CG}$  = Cantidad de cascarilla generada, [Kg/día].

$$MB_{RD} = 48219,18 \frac{kg \text{ raquis}}{día} + 33000 \frac{kg \text{ cascarilla}}{día}$$

$$MB_{RD} = 81219,18 \text{ [kg/día]}$$

El porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste en la mezcla es:

$$\% \text{Cascarilla} = \frac{33000 \text{ Kg cascarilla/día}}{81219,18 \text{ Kg mezcla/día}} * 100$$

$$\% \text{Cascarilla} = 40,63\%$$

**5.8.2. Cálculo del porcentaje de cenizas de la mezcla de residuos biomásicos disponibles.** Para realizar este cálculo hacemos uso de la ecuación (10):

$$\% \text{Cenizas} = -0.0086 * \% \text{Cascarilla} + 4.0348$$

$$\% \text{Cenizas} = -0.0086 * 40,63 + 4.0348$$

$$\% \text{Cenizas} = 3,685 \%$$

**5.8.3. Cálculo del porcentaje de humedad de la mezcla de residuos biomásicos disponibles.** Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación (11):

$$\% \text{Humedad} = -0.0111 * \% \text{Cascarilla} + 6.3679$$

$$\% \text{Humedad} = -0.0111 * 40,63 + 6.3679$$

$$\% \text{Humedad} = 5,917 \%$$

**5.8.4. Cálculo del porcentaje de C, H, N, S de la mezcla de residuos biomásicos disponibles.** Para realizar estos cálculos se utilizó las ecuaciones (13), (14), (15) y (16) que representan al porcentaje de C, H, N, S respectivamente.

$$\% \text{C} = 0,0458 * \% \text{Palmiste} + 45,64$$

$$\% \text{C} = 0,0458 * 40,63 + 45,64$$

$$\% \text{C} = 47,500 \%$$

$$\% \text{H} = 0,0046 * \% \text{Palmiste} + 5,7543$$

$$\% \text{H} = 0,0046 * 40,63 + 5,7543$$

$$\% \text{H} = 5,941\%$$

$$\% N = -0,0071 * \% Palmiste + 1,4782$$

$$\% N = -0,0071 * 40,63 + 1,4782$$

$$\% N = 1,189 \%$$

$$\% S = -0,0014 * \% Palmiste + 0,4588$$

$$\% S = -0,0014 * 40,63 + 0,4588$$

$$\% S = 0,402$$

**5.8.5. Cálculo del poder calorífico de la mezcla de residuos biomásicos disponibles.** Para este cálculo se utilizó el modelo de regresión lineal múltiple establecido en la ecuación (19):

$$P.C.B_{MR} = 14324,55 + 4,50 * \%C + 1190,73 * \%H + 1321,57 * \%N - 3938,84 * \%S \\ + 1781,55 * \%Hum - 3700,8 * \%Cn$$

$$P.C.B_{MR} = 14324,55 + 4,50 * 47,5 + 1190,73 * 5,941 + 1321,57 * 1,189 \\ - 3938,84 * 0,402 + 1781,55 * 5,917 - (3700,8 * 3,685)$$

$$P.C.B_{MR} = 18504,343 \text{ [KJ/kg]}$$

## **5.9. Cálculo del potencial energético de la mezcla de residuos biomásicos disponibles.**

Para este cálculo se utilizó la ecuación (9):

$$PE_{BR} = \frac{1}{3153600} * A_c * P_{ah} * f_{BR} * PC_{BR}$$

Donde:

$PE_{BR}$  = Potencial energético de la biomasa residual (MW)

$A_c$  = Área cultivada

$P_{ah}$  = Producción materia prima por año y hectárea

$f_{BR}$  = Factor de biomasa residual del proceso (0,22 para el raquis y 0,60 para la cascarilla)

$PC_{BR}$  = Poder calorífico de la biomasa residual

El factor (1/3153600) es el factor de conversión que permite obtener el potencial energético o energía disponible en kilovatios (KW).

$$PE_{BR} = \frac{1}{3153600} \left( 5000 \text{ ha} * 16 \frac{\text{ton f.p}}{\text{año}} * 0.22 + 20075 \frac{\text{ton nuez}}{\text{año}} * 0.6 \right) * 18504,343 \text{ KJ/Kg}$$

$$PE_{BR} = 17394,76 \text{ KW} \cong 17,395 \text{ MW}$$

## 6. DISCUSIÓN

- Para el estudio se utilizó cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana procedentes del mismo sitio, es decir, de la misma plantación con el fin de disminuir variaciones significativas en los ensayos realizados, principalmente en lo referente a composición elemental y poder calorífico, ya que es conocido que la calidad de la biomasa, su desarrollo y su composición dependen en gran medida del tipo de suelo bajo el cual esta fue cultivada.
- Para este estudio, se aseguró la conservación de las muestras de biomasa a ser estudiadas para evitar una descomposición acelerada de la misma bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Quito. Por lo que estas fueron aisladas del aire ambiente mediante fundas ziploc con sellado hermético para evitar humedecimiento o pérdida de humedad de la cascarilla de nuez de palmiste y del raquis de palma.
- El proceso de trituración del raquis de palma pudo haber conllevado a una variación de su porcentaje de humedad, ya que para lograr este procedimiento, el raquis previamente tuvo que ser cortado en trozos muy pequeños y estuvo durante un largo tiempo expuesto al ambiente, principalmente expuesto al calor ambiental, lo que resultaría en una disminución de su contenido de humedad.
- Los modelos matemáticos obtenidos mediante los procesos de regresión simple, así como el modelo matemático de la regresión lineal múltiple son para mezclas de cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma. Por lo que estos modelos no se los puede generalizar para predecir las propiedades de otro tipo de residuos biomásicos, ya que cada tipo de biomasa tiene sus características. Pero se puede tomar como modelo de estudio al proceso desarrollado en este trabajo para distintos residuos biomásicos.
- Se realizó una regresión lineal múltiple para determinar el poder calorífico con el fin de integrar todas las variables que explican la influencia en la cantidad de energía disponible en un proceso de combustión directa de la biomasa.



- Del gráfico que relaciona el porcentaje de azufre en función del porcentaje de cascarilla, se puede observar que el coeficiente de correlación  $R^2 = 0,7852$ , lo que nos indicaría que el modelo al cual los datos se ajustan no es el adecuado, sin embargo, esto se debe a que prácticamente el contenido de azufre permanece constante en las mezclas en donde predomina el contenido de cascarilla por encima del 50%, pero ya que la mezcla final contiene solo un 40% de cascarilla, se puede aceptar el modelo establecido ya que existe variación considerable del azufre entre el 0 y 50% de cascarilla presente en las mezclas.
- Para este estudio no se toma en cuenta la variación de presión y temperatura entre la ciudad de Quininde donde fueron tomadas las muestras y la ciudad de Quito donde se realizaron los análisis ya que no representa una gran influencia tanto para el análisis de composición elemental y poder calorífico, pero si podrían tener cierta influencia en el contenido de humedad, en especial la temperatura.
- La variable eliminada y excluida del modelo de regresión lineal múltiple por parte del software SPSS corresponde a la composición elemental de oxígeno en la mezcla, esto se debe, a que como se indica en la tabla 37, tiene una tolerancia cercana a cero, lo que indica que esta variable es redundante, es decir, proviene de una combinación lineal de las restantes. El software tiene por defecto un criterio de tolerancia de 0,05, es decir, que tiene un 95% de nivel de confianza de que los datos ingresados ayuden a explicar la variabilidad de Y, si este valor de tolerancia es cercano a cero, la variable será excluida.
- Al calcular el poder calorífico con la ecuación de Gaur-Reed y compararlo con los valores experimentales, existe un gran porcentaje de error, por lo que si se hubiera ocupado esta correlación generalizada para calcular la energía disponible para la mezcla final encontrada, se tendría una propagación de error en el cálculo del potencial energético. Por esto se justifica el desarrollo del modelo matemático particularizado para mezclas de cascarilla de palmiste y raquis.
- El valor calculado del potencial energético o energía disponible en megavatios (MW) no corresponde a la cantidad de energía eléctrica generada en un proceso de combustión directa. La cantidad de energía eléctrica generada debe obtenerse haciendo uso de la eficiencia de conversión energética en una termoeléctrica mediante un estudio adicional, por lo que el valor aquí presentado corresponde a la cantidad de energía química almacenada en el recurso biomásico disponible de la empresa AEXAV.

## 7. CONCLUSIONES

- Se cumplió con el objetivo propuesto de definir la energía disponible en una mezcla conformada por cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma africana, ya que se obtuvo como resultado que la cantidad de energía disponible es 17,395 MW con una mezcla del 40,63% de cascarilla de nuez de palmiste.
- El estudio realizado en este trabajo de tesis proporciona información valiosa para la Extractora de Aceite de Palmiste AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales), ya que proporciona el siguiente modelo matemático que permite obtener el contenido energético de cualquier mezcla en cualquier proporción de cascarilla en una mezcla:

$$P.C.B = 14324,55 + 4,50 * \%C + 1190,73 * \%H + 1321,57 * \%N - 3938,84 * \%S \\ + 1781,55 * \%Hum - 3700,8 * \%Cn$$

- Al analizar la variación entre el porcentaje de cenizas y el porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste en las mezclas cascarilla-raquis, se observa que existe una relación inversa, es decir a mayor contenido de cascarilla menor contenido de cenizas se obtendrá tras la combustión, con lo que se concluye que para el proceso de generación de energía eléctrica mediante combustión directa de la mezcla conformada por un 40,63% de cascarilla, se obtendrá un contenido de cenizas de 3,685 %
- Analizando los resultados de composición elemental, humedad y poder calorífico de la mezcla compuesta por 40,63% de cascarilla, se concluye que esta mezcla posee un contenido de cenizas de 3,685%, contenido de carbón elemental 47,5% e hidrógeno de 5.941%, lo que arroja un poder calorífico de 18504,343 KJ/Kg, lo que la califica como un biocombustible sólido de alta calidad energética.

- El contenido de azufre determinado de la mezcla conformada por un 40,63 % de cascarilla de nuez de palmiste es %S =0,402, se puede concluir que este biocombustible presentará un impacto ambiental menor al ser comparada con los combustibles convencionales usados en generadores de vapor ya que los gases procedentes del proceso de combustión contendrán un menor contenido de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>.
- De las relaciones establecidas en los gráficos de poder calorífico en función del contenido de nitrógeno, oxígeno, humedad, se puede concluir que todas presentan una relación inversa, ya que a mayor contenido de nitrógeno y humedad, menor será el poder calorífico de la mezcla.
- Se obtuvo como resultados los siguientes modelos matemáticos para predecir el contenido de carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, cenizas y humedad en mezclas de cascarilla de nuez de palmiste y raquis:

$$\% \text{ **CENIZAS** } = -0.0086 * \% \text{ *Palmiste* } + 4.0348$$

$$\% \text{ **HUMEDAD** } = -0.0111 * \% \text{ *Palmiste* } + 6.3679$$

$$\% \text{ **C** } = 0,0458 * \% \text{ *Palmiste* } + 45,64$$

$$\% \text{ **H** } = 0,0046 * \% \text{ *Palmiste* } + 5,7543$$

$$\% \text{ **N** } = -0,0071 * \% \text{ *Palmiste* } + 1,4782$$

$$\% \text{ **S** } = -0,0014 * \% \text{ *Palmiste* } + 0,4588$$

## **8. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda hacer un estudio adicional de la influencia que tiene las estaciones climáticas en el comportamiento de la cascarilla de nuez de palmiste y raquis de palma destinados a ser utilizados como combustible para poder establecer de manera precisa rangos de datos de las variables tales como composición elemental y humedad.
- Se sugiere realizar un estudio económico-financiero para un proyecto que contemple la implementación de una planta de generación eléctrica usando como combustible, la mezcla final establecida de cascarilla de nuez de palmiste-raquis de palma.
- Se recomienda a la empresa AEXAV (Agroindustrias Extractoras de Aceites Vegetales) utilizar estos residuos biomásicos en la composición establecida en 40,63% de cascarilla de nuez de palmiste y 59,37% de raquis de palma como combustible para generar electricidad, para dar un valor agregado a estos residuos y así ahorrar dinero al generar su propia electricidad.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAMÍREZ Paola Alejandra. Elaboración de briquetas de carbón a partir de la cascarilla de nuez de palmiste. Trabajo de Grado. Ingeniera Química. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2012. p. 1.
- [2] IBID (1). p. 2.
- [3] NARVAEZ, Ricardo. Use of rice waste for energy production in Ecuador. Energy and Power 2013, 3(3): 27-36, 2013.
- [4] FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Editorial Users S.A. San José-Costa Rica. 2002. p. 4.
- [5] IBID (4). p. 6.
- [6] RAMÍREZ, Paola Alejandra. Elaboración de briquetas de carbón a partir de la cascarilla de nuez de palmiste. Trabajo de Grado. Ingeniera Química. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2012. p. 4.
- [7] PEREZ, Gerónimo Estuardo. Biomasa residual húmeda. Sacatepéquez-Guatemala (En línea), 2009, (Fecha de consulta: 13 de Enero de 2014). Disponible en:<http://geroperez.blogspot.com/2009/biomasa-residual-humeda.html>.
- [8] FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Editorial Users S.A. San José-Costa Rica. 2002. p. 7.
- [9] NOGUÉS, Fernando Sebastián. Energías Renovables: Energía de la Biomasa. Prensas Universitarias de Zaragoza. España. 2010. pp. 34-35.
- [10] FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Editorial Users S.A. San José-Costa Rica. 2002. p. 10.

- [11] NOGUÉS, Fernando Sebastián. Ciclo energías renovables. Jornadas de biomasa. Zaragoza-España, (En línea), Abril 2002, (Fecha de consulta: 13 de enero de 2014). Disponible en: [http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule\\_Gralidades\\_biomasa.pdf](http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule_Gralidades_biomasa.pdf)
- [12] SÚBERO, Elena. Caracterización de los combustibles sólidos. Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial. Zaragoza. (En línea), 2010, (Fecha de consulta: 10 de octubre de 2013). Disponible en: <http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2010/5357/TAZ-PFC-2010-348.pdf>
- [13] FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Editorial Users S.A. San José-Costa Rica. 2002. p. 10
- [14] NOGUÉS, Fernando Sebastián. Energías Renovables: Energía de la Biomasa. Prensas Universitarias de Zaragoza. España. 2010. p. 44.
- [15] BROWN, Robert C. Thermochemical processing of biomass. Conversion into fuels, chemicals and power. Editorial Wiley. Gran Bretaña. 2011. p. 24.
- [16] RAMÍREZ, Paola Alejandra. Elaboración de briquetas de carbón a partir de la cascarilla de nuez de palmiste. Trabajo de Grado. Ingeniera Química. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2012. p. 13.
- [17] NOGUÉS, Fernando Sebastián. Energías Renovables: Energía de la Biomasa. Prensas Universitarias de Zaragoza. España. 2010. p. 44.
- [18] SÚBERO, Elena. Caracterización de los combustibles sólidos. Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial. Zaragoza. (En línea), 2010, (Fecha de consulta: 10 de octubre de 2013). Disponible en: <http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2010/5357/TAZ-PFC-2010-348.pdf>
- [19] BROWN, Robert C. Thermochemical processing of biomass. Conversion into fuels, chemicals and power. Editorial Wiley. Gran Bretaña. 2011. p. 29.
- [20] NOGUÉS, Fernando Sebastián. Ciclo energías renovables. Jornadas de biomasa. (En línea), Abril 2002, (Fecha de consulta: 13 de enero de 2014). Disponible en: [http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule\\_Gralidades\\_biomasa.pdf](http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule_Gralidades_biomasa.pdf)

- [21] CERDÁ, Emilio. Energía obtenida a partir de la biomasa. ICE, 1(83): 122-123, 2012. (En línea), 2012, (Fecha de consulta: 20 de enero 2014). Disponible en: <http://www.revistasice.com>.
- [22] SUBSECRETARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Energías Renovables. Energía biomasa. (En línea), 2008, (Fecha de consulta: 05 de febrero de 2014). Disponible en: [http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf).
- [23] DEL CAMPO, Estela Bretaña. Estudio técnico- económico de la instalación de una planta de biomasa para generación eléctrica. Trabajo de Grado. Ingeniera Industrial. Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Madrid. 2007. p. 60.
- [24] BROWN, Robert C. Thermochemical processing of biomass. Conversion into fuels, chemicals and power. Editorial Wiley. Gran Bretaña. 2011. p. 19.
- [25] GARCÍA, Juan E. Combustión directa de la biomasa. Escuela de Organización Industrial. (En línea), 2008, (Fecha de consulta: 20 de marzo de 2014). Disponible en: [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf).
- [26] FOCER. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Editorial Users S.A. San José-Costa Rica. 2002. p. 13.
- [27] FORERO, Carlos A. Estudio preliminar del potencial energético de hueso de palma y cáscara de coco en Colombia. Revista Ingeniería Solidaria, Vol. 8, (14) 2012, pp 19-25.
- [28] ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. Presentaciones tareas. Home page. 27 de agosto de 2010 <<http://blog.espol.edu.ec/alexg/2010/08/27/biomasa-ventajas-y-desventajas/>>
- [29] BS- EN 14774-3:2009, Solid biofuels Determination of moisture content —Oven dry method Part 3: Moisture in general analysis samples, British Standard, European Standard, Great British 2009. p 4-5.
- [30] BS-EN 14775:2009, Solid biofuels —Determination of ash content, British Standard, European Standard, Great British 2009.p 5-6

- [31] BS-EN 15104:2011, Solid biofuels — Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen —Instrumental methods, British Standard, European Standard, Great British 2011. p 5-9.
- [32] BS-EN 14918:2009, Solid biofuels —Determination of calorific value, British Standard, European Standard, Great British 2009. p 8-11.
- [33] RODRIGUEZ, María Jose. Universidad de Alicante. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. Valencia-España. (En línea), 2001, (Fecha de consulta: 20 de abril de 2014). Disponible en:  
<<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8143/1/Regresion%20MUTIPLE.pdf>>



## **BIBLIOGRAFÍA**

BAQUERO, Juan. Biodegradación de raquis de palma africana, desecho de la agroindustria de extracción de aceite, y su posible utilización como biofertilizante mediante un proceso de compostaje húmedo. Trabajo de Grado. Ingeniero Ambiental. Universidad Internacional SEK. Facultad de Ciencias Ambientales. Quito. 2005

BEDARUL, Alam. Road network optimization model for supplying woody biomass feedstock for energy production in Northwestern Ontario. The open forest science journal. Faculty of Natural Resources Management. Lakehead University. Ontario, Canada. 2012.

BROWN Robert C. Thermochemical processing of biomass. Conversion into fuels, chemicals and power. Editorial Wiley. Gran Bretaña. 2011.

CASTRO, Miguel. Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental (CEDA). Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador. Quito. 2011.

FERNÁNDEZ, Jorge. Máquinas térmicas. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad de Ingeniería Electromecánica. Mendoza, Argentina. 2012.

LOZANO, Sergio. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Tesis Doctoral. Ingeniero Químico. Universidad de Gerona. Facultad de Ingeniería Química y Ambiental. Gerona, España. 2009.

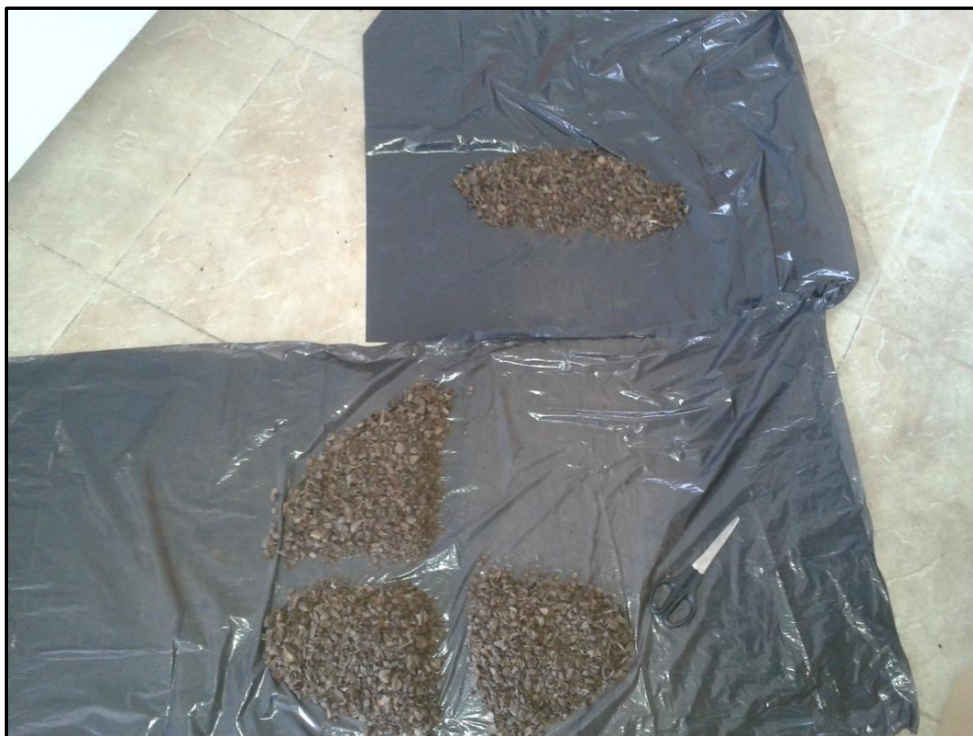
NARVÁEZ, Ricardo. Use of rice crops waste for energy production in Ecuador. National Institute of Energy Efficiency and Renewable Energy (INER). Quito, 2013

RAMÍREZ, Paola Alejandra. Elaboración de briquetas de carbón a partir de la cascarilla de nuez de palmiste. Trabajo de Grado. Ingeniera Química. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2012.

United Nations Development Program (UNDP). Malaysia generating renewable energy from palm oil wastes. Malaysia. 2007.

# **ANEXOS**

**ANEXO A. Cuarteo de la muestra de cascarilla de nuez de palmiste**



## **ANEXO B. Raquis de palma africana**



### **ANEXO C. Cuarteo de la muestra de raquis de palma africana**



**ANEXO D. Mezclas con mayor porcentaje de cascarilla de nuez de palmiste**





## ANEXO E. Mezclas con mayor porcentaje de raquis



**ANEXO F. Analizador Elemental (SERIES II CHNS/O ANALYZER 2400)**





## ANEXO G. Bomba calorimétrica



## ANEXO H. Norma para determinación de humedad

2014, Uncontrolled Copy. (c) The British Standards Institution 2013

BS EN 14774-3:2009

EUROPEAN STANDARD  
NORME EUROPÉENNE  
EUROPÄISCHE NORM

EN 14774-3

October 2009

ICS 75.160.10

Supersedes CEN/TS 14774-3:2004

English Version

**Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample**

Biocombustibles solides - Méthodes de détermination de la teneur en humidité - Méthode par séchage à l'étuve - Partie 3 : Humidité de l'échantillon pour analyse générale

Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 3: Wassergehalt in allgemeinen Analysenproben

This European Standard was approved by CEN on 20 September 2009.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

## ANEXO J. Norma para determinación de cenizas

2014, Uncontrolled Copy. (c) The British Standards Institution 2013

BS EN 14775:2009

EUROPEAN STANDARD  
NORME EUROPÉENNE  
EUROPÄISCHE NORM

EN 14775

November 2009

ICS 75.160.10

Supersedes CEN/TS 14775:2004

English Version

**Solid biofuels - Determination of ash content**

Biocombustibles solides - Méthode de détermination de la teneur en cendres      Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes

This European Standard was approved by CEN on 3 October 2009.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

## ANEXO K. Norma para determinación composición elemental

EUROPEAN STANDARD  
NORME EUROPÉENNE  
EUROPÄISCHE NORM

BS EN 15104:2011

**EN 15104**

February 2011

---

ICS 75.160.10

Supersedes CEN/TS 15104:2005

English Version

**Solid biofuels - Determination of total content of carbon,  
hydrogen and nitrogen - Instrumental methods**

Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale  
en carbone, hydrogène et azote - Méthodes instrumentales

Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes  
an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff - Instrumentelle  
Verfahren

This European Standard was approved by CEN on 25 December 2010.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN-CENELEC Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN-CENELEC Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

## ANEXO L. Norma para determinar poder calorífico

1/2014, Uncontrolled Copy, (c) The British Standards Institution 2013

BS EN 14918:2009

EUROPEAN STANDARD

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

EN 14918

December 2009

ICS 75.160.10

Supersedes CEN/TS 14918:2005

English Version

**Solid biofuels - Determination of calorific value**

Biocombustibles solides - Détermination du pouvoir calorifique

Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Heizwertes

This European Standard was approved by CEN on 10 October 2009.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

## ANEXO M. Poder calorífico cascarilla de nuez de palmiste



### UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



#### INFORME DE RESULTADOS PETROLEO

Suplemento Informe N° 13-12-04-P-6  
Fecha 2014-03-31

Referencia: OT: 13-12-04-P  
Atención: Sr. David Gaona  
Empresa: ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Dirección: Ciudadela Universitaria  
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos  
Tipo de muestra: Cascarilla  
Identificación de la muestra: MEZCLA A 100% PALM  
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica  
Fecha de ingreso de la muestra: 2013-12-09  
Código de muestra: OE-13-12-04-P-6  
Fecha de realización de ensayos: 2014-02-06

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	19,25

**Nota.-** Los ensayos marcados (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE

**Nota.-** Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010

**Condiciones Ambientales.-** Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C

## ANEXO N. Poder calorífico raquis de palma africana



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



**INFORME DE RESULTADOS**  
**PETROLEO**

Informe N° 13-12-04-P-7  
Fecha 2014-02-10

Referencia: OT: 13-12-04-P  
Atención: Sr. David Gaona  
Empresa: ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Dirección: Ciudadela Universitaria  
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos  
Tipo de muestra: Cascarilla  
Identificación de la muestra: MEZCLA B 100% RAQ  
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica  
Fecha de ingreso de la muestra: 2013-12-09  
Código de muestra: OE-13-12-04-P-7  
Fecha de realización de ensayos: 2014-02-06

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/M102 Ref. ASTM D-240	17,75

**Nota.-** Los ensayos marcados (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE

**Nota.-** Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010


**Condiciones Ambientales.-** Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C

**ANEXO P. Poder calorífico mezcla 90% de cascarilla de nuez de palmiste**


	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
<div>Informe N° 14-02-01-P-3 Fecha 2014-03-17</div>										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 14-02-01-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 3 (90% PALM-10% RAQ) (28-01-2014) Sin descripción específica 2014-02-03 OE-14-02-01-P-3 2014-02-13									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td style="text-align: center;">PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">19,13</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	19,13
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	19,13							
<p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p style="text-align: center;"><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,6 mmHg; Temperatura: 20,1 °C</p>										



## ANEXO Q. Poder calorífico mezcla 80% cascarilla de nuez de palmiste

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
Informe N° 14-02-01-P-4 Fecha 2014-03-17										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 14-02-01-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 4 (80% PALM 20% RAQ) (28-01-2014) Sin descripción específica 2014-02-03 OE-14-02-01-P-4 2014-02-13									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td style="text-align: center;">PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">19,04</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	19,04
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	19,04							
<p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p style="text-align: center;"><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,6 mmHg; Temperatura: 20,1 °C</p>										

## ANEXO R. Poder calorífico mezcla 70% cascarilla de nuez de palmito

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
Informe N° 14-02-01-P-2 Fecha 2014-03-17										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 14-02-01-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 70% PALM- 30%RAQ (26-01-2014) Sin descripción específica 2014-02-03 OE-14-02-01-P-2 2014-02-13									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td style="text-align: center;">PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,99</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,99
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,99							
<p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p style="text-align: center;"><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,6 mmHg; Temperatura: 20,1 °C</p>										

## ANEXO S. Poder calorífico mezcla 60% cascarilla de nuez de palmiste



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



**INFORME DE RESULTADOS**  
**PETROLEO**

Informe N° 14-02-01-P-1  
Fecha 2014-03-17

Referencia: OT: 14-02-01-P  
Atención: Sr. David Gaona  
Empresa: ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA  
Dirección: Ciudadela Universitaria  
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos  
Tipo de muestra: Cascarilla  
Identificación de la muestra: MEZCLA 1 60% PALM- 40% RAQ 28-01-2014  
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica  
Fecha de ingreso de la muestra: 2014-02-03  
Código de muestra: OE-14-02-01-P-1  
Fecha de realización de ensayos: 2014-02-13



DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,75

**Nota.**- Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010


**Nota.**- Los ensayos marcados (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE

**Condiciones Ambientales.**- Presión 544,6 mmHg; Temperatura: 20,1 °C

## ANEXO T. Poder calorífico mezcla 50% cascarilla de nuez de palmiste

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
<hr/>										
		Suplemento Informe N° 13-12-04-P-1 Fecha 2014-03-31								
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 13-12-04-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 1 (50% PALM-50% RAQ) Sin descripción específica 2013-12-09 OE-13-12-04-P-1 2014-02-06									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td>Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td>PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,64</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,64
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,64							
<p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C</p>										

## ANEXO U. Poder calorífico mezcla 40% cascarilla de nuez de palmiste

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
<div>Suplemento Informe N° 13-12-04-P-2 Fecha 2014-03-31</div>										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 13-12-04-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 2 (40% PALM-60% RAQ) Sin descripción específica 2013-12-09 OE-13-12-04-P-2 2014-02-06									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td>Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td>PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,55</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	18,55
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	18,55							
<p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C</p>										

## ANEXO V. Poder calorífico mezcla 30% cascarilla de nuez de palmiste



	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
		Suplemento Informe N° 13-12-04-P-3 Fecha 2014-03-31								
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 13-12-04-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 3 (30% PALM-70% RAQ) Sin descripción específica 2013-12-09 OE-13-12-04-P-3 2014-02-06									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td>Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td>PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,49</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	18,49
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MI02 Ref. ASTM D-240	18,49							
<p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C</p>										



**ANEXO W. Poder calorífico mezcla 20% cascarilla de nuez de palmito.**

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
Suplemento Informe N° 13-12-04-P-4 Fecha 2014-03-31										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 13-12-04-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 4 (20% PALM-80% RAQ) Sin descripción específica 2013-12-09 OE-13-12-04-P-4 2014-02-06									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td style="text-align: center;">PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,25</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,25
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,25							
<p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C</p>										

**ANEXO X. Poder calorífico mezcla 10% de cascarilla de nuez de palmiste.**

	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN									
<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>PETROLEO</b>										
Suplemento Informe N° 13-12-04-P-5 Fecha 2014-03-31										
<b>Referencia:</b> <b>Atención:</b> <b>Empresa:</b> <b>Dirección:</b> <b>Tipo de ensayos:</b> <b>Tipo de muestra:</b> <b>Identificación de la muestra:</b> <b>Descripción de la Muestra:</b> <b>Fecha de ingreso de la muestra:</b> <b>Código de muestra:</b> <b>Fecha de realización de ensayos:</b>	<b>OT: 13-12-04-P</b> Sr. David Gaona <b>ESTUDIANTE FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b> Ciudadela Universitaria Análisis Físicoquímicos Cascarilla MEZCLA 5 (10% PALM-90% RAQ) Sin descripción específica 2013-12-09 OE-13-12-04-P-5 2014-02-06									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="text-align: center;">DETERMINACIÓN</th><th style="text-align: center;">UNIDADES</th><th style="text-align: center;">MÉTODO</th><th style="text-align: center;">RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">Poder Calórico Bruto*</td><td style="text-align: center;">MJ/kg</td><td style="text-align: center;">PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240</td><td style="text-align: center;">18,10</td></tr></tbody></table>			DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,10
DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO							
Poder Calórico Bruto*	MJ/kg	PNE/DPEC/P/MIO2 Ref. ASTM D-240	18,10							
<p><b>Nota.-</b> Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE</p> <p><b>Nota.-</b> Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010</p> <p><b>Condiciones Ambientales.-</b> Presión 544,4 mmHg; Temperatura: 19,8 °C</p>										